重庆市工程建设标准

重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南

Guide specification for vessel collision design of river-crossing bridges in three gorges reservoir of Chongqing city

DBJ/T50-106-2010

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司
同济大学
批准部门：重庆市城乡建设委员会
施行日期：2010年10月1日

重庆工程建设

2010 重庆

重庆市城乡建设委员会文件

渝建发[2010]120号

重庆市城乡建设委员会
关于发布《三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》的通知

各区县(自治县)城乡建委,有关单位:

现批准《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》为我市推荐性工程建设标准,编号为:DBJ/T50-106-2010,自2010年10月1日起实施。

本指南由重庆市城乡建设委员会负责管理,招商局重庆交通科研设计院有限公司负责解释。

重庆市城乡建设委员会

二〇一〇年八月十一日

重庆工程建设

关于同意重庆市《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》地方标准备案的函

建标标备[2010]128号

重庆市城乡建设委员会：

你委《关于工程建设地方标准＜重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南＞备案的申请》收悉。经研究，同意该标准作为“中华人民共和国工程建设地方标准”备案，其备案号为：J11678-2010。

该项标准的备案公告，将刊登在近期出版的《工程建设标准化》刊物上。

住房和城乡建设部标准定额司

二〇一〇年八月三十日

重庆工程建设

前　言

当前，由于跨江河桥梁的大量修建，通航船舶的规模化，加上桥区环境的改变，导致船桥碰撞事故时有发生。船撞桥事故不但威胁船舶的通行安全，还严重影响桥梁的运营安全，往往带来巨大的生命和财产损失。重庆作为我国西南的中心城市，其桥梁数量众多，桥型多样，堪称我国的“桥都”。近年来，随着三峡水库的建成，重庆市境内的河流兼具库区及山区河流的双重特征，水位落差大，流速急，桥梁的船撞问题尤为突出。而当前我国在桥梁的船撞设计方面，往往借用国外的标准、规范或指南，但国外规范毕竟有许多不符合我国实际情况的因素，这在很大程度上制约了我国的桥梁船撞设计。为此，结合目前国际上通用的风险设计思想，并基于性能的设计理念，开展桥梁船撞研究，并形成规范性文件，以指导重庆市桥梁的船撞设计，具有重大的现实意义，同时对其他流域跨江河桥梁的船撞设计也具有参考意义。

经重庆市城乡建设委员会 2008 年立项，招商局重庆交通科研设计院有限公司、同济大学等单位编制完成了《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》。本指南明确了三峡库区桥梁船撞设计的设防水准及性能要求，提出了桥梁船撞风险评估方法及船撞力估算方法，并对结构的主动抗撞设计与被动防撞设计做了规定。

各有关单位在使用本指南过程中若有疑问或建议，请函告招商局重庆交通科研设计院有限公司（重庆南岸学府大道 33 号，邮编 400067），以便今后修订时参考。

本规范主编单位、参编单位、主要起草人及审查专家：

主 编 单 位：招商局重庆交通科研设计院有限公司
同济大学

参 编 单 位：重庆交通建设（集团）有限责任公司
成都臣基科技有限公司

主要起草人：王福敏　王君杰　汪　宏　耿　波　李　军
石　飞　尚军年　张　茜　赵志刚　安永日
杜细春　吴宏宇　汤海军　危接来

审 查 专 家：（按姓氏笔画排序）文传平　龙怀能　张佐安　张建华　杨　忠
杨渡军　陈德玖　钟明全　顾安邦　蒋中贵
蒋劲松　蒋明贵　詹建辉

重庆工程建设

目　次

1　总　则 …… 1
2　术　语 …… 2
3　准则与方法 …… 4
3.1　设防水准及性能要求 …… 4
3.2　设计船撞力与设计代表船舶 …… 5
3.3　船舶撞击荷载组合 …… 8
4　一般规定 …… 9
4.1　基础资料收集 …… 9
4.2　通航条件 …… 9
4.3　桥位与桥跨 …… 9
4.4　通航孔与非通航孔 …… 10
4.5　船舶 …… 11
4.6　防撞设施 …… 11
4.7　航行监测与预警 …… 12
5　船舶撞击力估算方法 …… 13
5.1　一般规定 …… 13
5.2　船舶撞击的范围 …… 13
5.3　最小撞击力要求 …… 13
5.4　船舶撞击速度 …… 14
5.5　船舶撞击能量 …… 14
5.6　轮船对桥墩的撞击力 …… 15
5.7　轮船对桥梁上部结构的撞击力 …… 16
5.8　驳船对桥梁下部结构的撞击力 …… 16
6　桥梁结构主动抗撞设计 …… 18
6.1　一般规定 …… 18
6.2　撞击荷载位置与方式 …… 18
6.3　结构抗力计算要求 …… 20
6.4　船舶撞击荷载组合 …… 20
6.5　下部构造要求 …… 20
7　桥梁被动防撞设施设计 …… 22
7.1　一般规定 …… 22
7.2　常用被动防撞设施原理与构成 …… 22
7.3　三峡库区跨江桥梁被动防撞设施 …… 24
7.4　被动防撞设施的设计要求 …… 24
附录 A　方法 II 年碰撞频率计算方法 …… 25
本指南用词说明 …… 28
条文说明 …… 29

重庆工程建设

Contents

1 General provisions ····· 1
2 Terms ····· 2
3 Criterion and method ····· 4
3.1 Fortification level and performance requirements ····· 4
3.2 Design vessel-collision force and design typical vessel ····· 5
3.3 Load combination of vessel Impact ····· 8
4 General requirement ····· 9
4.1 Data collection ····· 9
4.2 Navigation condition ····· 9
4.3 Site and span of bridge ····· 9
4.4 Navigable and non-navigable spans ····· 10
4.5 Vessel ····· 11
4.6 Fender systems ····· 11
4.7 Navigation monitoring and prewarning ····· 12
5 Estimation method of vessel collision force ····· 13
5.1 General requirement ····· 13
5.2 Range of vessel impact ····· 13
5.3 Minimum Impact load ····· 13
5.4 Vessel Impact speed ····· 14
5.5 Vessel collision energy ····· 14
5.6 Ship collison force on pier ····· 15
5.7 Ship collison force on superstructure ····· 16
5.8 Barge collison force on pier ····· 16
6 Active resist-collision design ····· 18
6.1 General erquirement ····· 18
6.2 Location and mode of Impact load ····· 18
6.3 Structure resistance calculation requirements ····· 20
6.4 Load combination of vessel Impact ····· 20
6.5 Infrastructure requirements ····· 20
7 Passive fender systems design ····· 22
7.1 General erquirement ····· 22
7.2 Principle and composition of common fender systems ····· 22
7.3 Fender systems in three gorges reservoir ····· 24
7.4 Design requirements for fender sysetems ····· 24
Appendix A method Ⅱ collison probability calculation method ····· 25
This guide words instructions ····· 28
Provision that ····· 29

重庆工程建设

1 总 则

1.0.1 为规范桥梁防船撞设计，减轻船舶撞击对三峡库区跨江桥梁造成的破坏，避免或减少人员伤亡和经济损失，特制定本指南。

1.0.2 本指南适用于三峡库区跨江桥梁的船撞设计、增设防撞设施和桥梁加固设计，其它区域跨越航道桥梁船撞设计可参考使用。

1.0.3 桥梁船撞设计与加固使用的船舶类型应符合交通部《川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列》中关于船舶类型的规定。

1.0.4 三峡库区跨江桥梁在工程可行性研究或初步设计阶段，应进行桥梁的船舶撞击风险评估。

1.0.5 三峡库区跨江桥梁宜采用主动抗撞与被动防撞相结合的综合防撞措施。

1.0.6 三峡库区桥梁的防撞设计除应符合本指南外，尚应符合国家及重庆市现行有关标准和其它相关设计标准的规定。

2 术 语

2.0.1 桥梁船撞设计 bridge design against vessel-collision

桥梁船撞设计，包括抗船撞结构设计、防撞构造和助航措施设计。

2.0.2 设计船撞力 design vessel-collision force

用于桥梁基础、桥墩、上部结构设计的船舶撞击荷载。

2.0.3 设计代表船舶 design typical vessel

通过风险分析确定的，用于桥梁船撞设计的控制性船舶。

2.0.4 L1 船撞作用 vessel-collision action L1

重现期为 300 年的船撞荷载，对应于 L1 设防水准。

2.0.5 L2 船撞作用 vessel-collision action L2

重现期为 1500 年的船撞荷载，对应于 L2 设防水准。

2.0.6 主动抗撞设计 active resist-collision design

依靠桥梁结构自身的抗船舶撞击能力进行的抗撞设计。

2.0.7 被动防撞设计 passive anticollision design

在桥梁结构自身抗力之外，采取额外的防撞措施而进行的防撞设计。

2.0.8 倒塌概率 failure probability

桥梁遭受船舶撞击后，主体结构发生整体垮塌或失去使用功能的概率。

2.0.9 防撞设施 anticollision facility

专门用来防止、减小船舶撞击作用的工程结构。

2.0.10 助航系统 navigation-aid system

设置在桥梁上、航道中用于帮助过桥船舶顺利通过桥区的标

重庆工程建设

识或装置。

2.0.11 重要桥梁 significant bridge

跨越IV级航道的大桥和跨越IV级以上航道的各类桥梁，以及对救灾、经济、国防上具有重要意义的桥梁或破坏后修复（抢修）困难的桥梁。

2.0.12 通航孔和非通航孔 navigable and non-navigable spans

通过通航净空技术论证优先选定的桥梁的通航跨和非通航跨。

3 准则与方法

3.1 设防水准及性能要求

3.1.1 桥梁应按本节要求确定船撞设防重要性类别，以明确其船撞设防的水准。

3.1.2 桥梁应根据其使用功能的重要性分为三个船撞设防类别：

A类：跨越长江干线、嘉陵江和乌江III级航道及以上的特大桥和重要桥梁；

B类：IV级航道上的大桥及III级航道上的其他桥梁；

C类：IV级及以下航道上的其他桥梁。

对救灾以及在经济、国防上具有重要意义的桥梁或破坏后修复（抢修）困难的桥梁，可提高设防类别。

3.1.3 船撞设防性能目标及设防水准由设计部门提出，并经桥梁业主及有关政府部门批准。

3.1.4 桥梁船撞设防性能目标可按表3.1.4-1的规定确定。

表3.1.4-1 桥梁船撞设防性能目标

设防类别	设防水准	性能目标	桥梁状态描述	失效后果
A类	L1	I	桥梁可产生不影响结构整体受力性能的局部损伤，正常交通不受影响，结构整体处于弹性状态	一般
	L2	II	可发生易于修复的损伤	严重
B类	L1	I	桥梁可产生不影响结构整体受力性能的局部损伤，正常交通不受影响，结构整体处于弹性状态	一般
	L2	II	可发生较严重的损伤，但不发生整体倒塌	极其严重
C类	L1	I	可发生易于修复的损伤	一般
	L2	II	可发生较严重的损伤，但不发生整体倒塌	极其严重

3.1.5 桥梁船撞设防水准可根据船撞发生的重现期分L1船撞

重庆工程建设

作用和 L2 船撞作用两级设定，见表 3.1.5-1 和 3.1.5-2。

表 3.1.5-1　根据船撞重现期分级设定的桥梁船撞设防水准

船撞设防水准	重现期(年)
L1	300
L2	1500

桥梁船撞设计可按表 3.1.5-2 规定的目标失效概率进行。

表 3.1.5-2　安全极限状态年目标失效概率

结构安全措施的相对费用	失效后果轻微 (r ＜ 2.0)	失效后果中度 (2.0＜ r ＜ 5.0)	失效后果严重 (5.0＜ r ＜ 10.0)
大	10^{-3}	5×10^{-4}	10^{-4}
正常	10^{-4}	10^{-5}	5×10^{-5}
小	10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-7}

注：表 3.1.5-2 比值 r 失效后果的严重程度可按式计算：

$$r=\frac{C_{TC}}{C_{CC}}$$

式中：C_{CC}——建造成本；

C_{TC}——建造成本与其失效直接损失之和；

如果 r ＞10.0，并且损失数额大，则后果必须作为极端事件处理，建议采用费用－效益分析的方法。

3.1.6　桥梁船撞设防水准可按本规程 3.1.5 之规定确定。

3.2　设计船撞力与设计代表船舶

3.2.1　确定桥梁船撞效应分析中设计代表船舶的方法分为四种，即半确定性方法(方法 I)、重现期方法(方法 II)、目标极限状态概率法(方法 III)和费用－效益分析方法(方法 IV)。

3.2.2　确定设计代表船舶的方法符合下列规定：

1　方法 I 宜应用于以下情况的桥梁：

1)水深较浅的航道，且在这些航道上的船舶吨位不大；

2)航道中的船舶差别较小(即，航道中的船舶大小基本相同)；

3)基础资料较为缺乏。

2　方法 II 是一种基于桥梁船撞概率来选择设计代表船舶的方法。可用于各种情况下的桥梁。

3　方法 III 直接以桥梁在船舶撞击下，以某种设计极限状态对应的损伤概率来确定设计代表船舶。可用于各种情况下的桥梁。

4　方法 IV 是在以下条件下可采用的方法：

1)对既有桥梁进行船撞加固；

2)宽阔水域中很多桥梁构件存在被船舶撞击的风险。

3.2.3　设计代表船舶和设计船撞力的确定应符合下列规定

1　采用方法 I 确定设计代表船舶，并按 5.6～5.8 条款计算设计船撞力。

设计代表船舶的确定应区分 A、B 类桥梁和 C 类桥梁。

A、B 类桥梁：大于等于设计代表船舶的年通航量累计达 50 艘次或年通航量的 5%(两者取较小值)。

C 类桥梁：大于等于设计代表船舶的年通航量累计达 200 艘次或年通航量的 10%(两者取较小值)。

2　按方法 II 确定设计代表船舶与设计船撞力。

1)按附录 A 中式(A－1)和式(A-2)计算桥梁遭受船舶撞击的年频率，计算图示见图 A-1；

2)根据表 3.1.4-2 重现期的规定确定设计代表船舶。

3　按方法 III 确定设计代表船舶与设计船撞力。

1)按表 3.1.4-3 确定桥梁目标倒塌概率；

2)按 3.2.3 中 2 规定的方法计算各种类型船舶的年碰撞频率。

3)可采用下述方法的一种计算桥梁的船撞倒塌概率：

(1)一般的可靠度计算方法。采用该方法必须对所建立的可靠度计算模型进行详细的说明。

重庆工程建设

(2)倒塌概率曲线法。图 3.2.3-1 为 AASHTO 规范中的倒塌概率曲线。

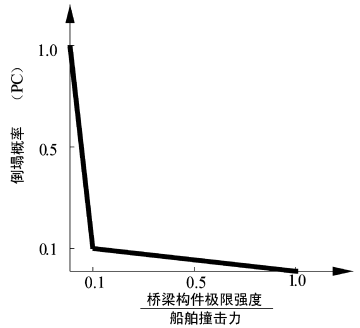

图 3.2.3-1　AASHTO **规范中的倒塌概率曲线图**

4)采用试算法调整桥梁结构抗船舶撞击的能力,达到目标倒塌概率的要求,进而确定出设计船撞力;

5)根据确定的设计船撞力,按第 5 章中的方法反推设计代表船舶。

4　当采用方法 I、方法 II 和方法 III 在经济上或技术上明显不合理时,应进行专题研究。方法 IV 的基本思想与原则是考虑期望风险损失后的广义造价最小,解释见图 3.2.3-2。

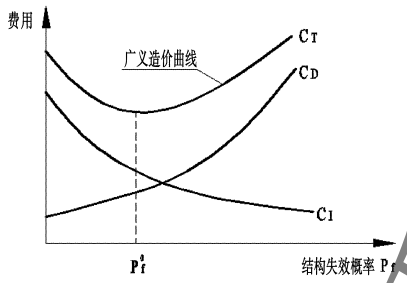

图 3.2.3-2　**方法 IV 的概念解释图**

图 3.2.3-2 中:

C_T ——为桥梁广义总造价;

C_D ——为桥梁初始造价;

C_I ——为期望总经济损失。

3.3　船舶撞击荷载组合

3.3.1　船舶撞击荷载组合按式(3.3.1)计算。

$$\gamma_{DC}+\gamma_{LV}LV+\gamma_{imp}IMP \tag{3.3.1}$$

式中:　DC——为永久荷载效应;

LV——为代表性活荷载效应;

IMP——为船舶撞击效应;

γ_{DC}、γ_{LV}、γ_{IMP}——为相应的组合系数。

3.3.2　荷载组合系数的取值按表 3.3.2。

表 3.3.2　**荷载组合系数取值**

荷载效应	组合系数
永久荷载效应 DC	$\gamma_{DC}=1.0$
代表性活荷载效应 LV	$\gamma_{LV}=0.0\sim1.0$
船舶撞击效应 IMP	$\gamma_{imp}=1.0$

3.3.3　流水压力的计算考虑一般洪水的作用。

重庆工程建设

4　一般规定

4.1　基础资料收集

4.1.1　用于确定桥梁船撞设防水准的各类资料应包括(但不限于)：

1　桥梁上、下部结构尺寸及材料信息。

2　桥区通航船舶的吨位分类信息。

3　不同吨位船舶的通航量数据。

4　不同吨位船舶的航速。

5　桥区通航船舶的习惯航迹。

6　桥区的航道资料。

7　桥区的气象及水文等。

8　通航及行洪论证有关资料。

4.2　通航条件

4.2.1　应明确单向、双向通航或其它通航情况的航道中心线和航道边界。

4.2.2　防撞设计水位应考虑航道水深的周期性变化。作为最低要求，防撞设计水位应不低于最低通航水位。

4.2.3　桥位处的水流应按与船舶航行方向一致的水流和与船舶航行方向垂直的横向水流进行计算。

4.3　桥位与桥跨

4.3.1　桥梁应尽可能的位于可通航河道的直线区域，远离弯道部分。

4.3.2　当桥位无法避开弯曲河道时，应加大桥梁跨径。

4.3.3　桥轴线应尽可能与航道中心线垂直。

4.3.4　尽可能将桥墩置于浅水区，以避免大型船舶的撞击和避免船舶直接撞击桩。

4.3.5　桥梁船撞设计应明确桥墩位置与航迹线的相对关系。

4.3.6　结合库区河流特点，根据水平净宽和竖向净高，确定桥梁下部构造与上部结构的几何特征。

4.3.7　桥梁通航孔的设置应考虑航道变迁的影响。

4.3.8　选择桥型时应考虑桥区通航条件和可预见的大水位落差。在选择中承式和上承式拱桥时，应特别注意船舶撞击拱圈的风险。

4.4　通航孔与非通航孔

4.4.1　通过航道的船舶和桥梁的通航孔之间的典型关系。

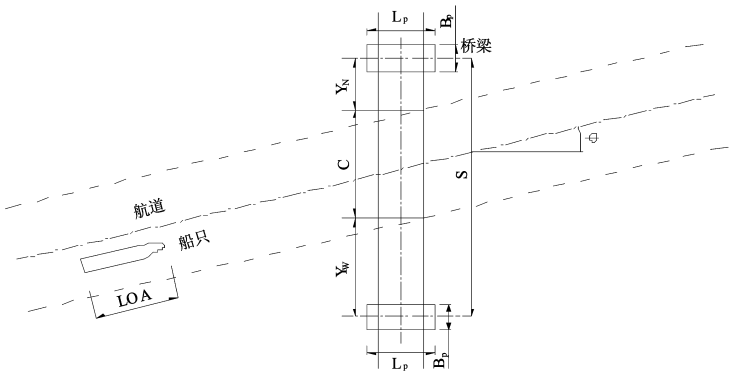

图 4.4.1　船舶与桥梁通航孔关系示意图

通过分析以往的船撞事故资料，在规划一座新桥时，通航水平净空的确定应遵循以下指导方针(与库区特点的结合)：

重庆工程建设

1　通航跨宜大于2～3倍的设计代表船舶长度；

2　通航跨宜大于2倍的航道宽度；

3　墩中心距航道边缘的距离(和)宜大于2～3倍的桥墩宽度；

4　航道中心线宜与通航孔中心线重合，若有困难，则二者之间最大偏移量不应超过主跨的15%。

4.4.2　桥梁竖向净高应满足最高通航水位下该航道上的船舶在空载压舱条件下通行时的最大船高的要求，以避免驾驶舱和桅杆撞击桥梁上部结构。

4.4.3　宜加大非通航孔的跨度以减少非通航孔水中桥墩的数目，非通航孔桥墩的抗撞击能力应根据风险评估结果确定。

4.5　船　舶

4.5.1　确定适合桥梁船撞设计的船舶分类应符合1.0.3条的规定；

4.5.2　船舶分类应考虑船舶吨位(DWT)、负载情况(满载，部分载，压舱)、航速、每种船型的年通航量。

4.5.3　各种类型船舶的年通航量统计应区分上水与下水船舶。

4.5.4　应区分驳船与轮船。

4.5.5　应预测未来5年、10年、20年各类船舶的通航量变化。

4.6　防撞设施

4.6.1　可采用被动防撞设施减小或避免船撞对桥梁的损伤。

4.6.2　被动防撞设施应与桥梁结构主体设计一同考虑。

4.6.3　被动防撞设施应考虑有效性、耐久性、可检修等综合因素。

4.7　航行监测与预警

4.7.1　通航密度大的重要桥梁宜设置桥区船舶航态监控和预警系统。

4.7.2　桥梁应按相关规范要求设置导助航标志。

4.7.3　桥区水域应设置导航和助航系统。

重庆工程建设

5　船舶撞击力估算方法

5.1　一般规定

5.1.1　桥梁船撞力计算的基本方法可采用等效静力方法。

5.1.2　船撞计算模型与方法的选取应满足桥梁船撞性能目标的验算要求。

5.1.3　船撞效应的计算应选取可准确反映船撞时桥梁结构力学行为特点的计算模型。

5.2　船舶撞击的范围

5.2.1　各种船舶撞击桥梁的范围为航道中心线两侧 3 倍设计代表船舶长度 *LOA* 范围内的桥梁结构，但应考虑水深的影响。

5.2.2　位于航道中心线两侧 3 倍 *LOA* 范围外的桥梁结构按本规程第 5.3 节确定的最小撞击力来设计。

5.3　最小撞击力要求

5.3.1　航道中心线两侧 3 倍设计代表船舶长度以外水域中的桥梁构件，根据设计代表船舶以年平均水流速度撞击确定其船撞力；由于水深原因，设计代表船舶不能到达时，根据可到达的最大船舶以年平均水流速度撞击确定其船撞力。

5.3.2　航道中心线两侧 3 倍设计代表船舶长度范围内的桥梁构件的船舶撞击力应不小于设计代表船舶以年平均水流速度撞击产生的撞击力。

5.4　船舶撞击速度

5.4.1　船舶撞击速度的最小值应不小于航道所在位置处的年平均水流流速。

5.4.2　在季节性洪水较为明显的航道上，确定最小船舶撞击速度时需进行专门的数据资料调查。

5.4.3　船舶的撞击速度可按照图 5.4.3 进行计算。

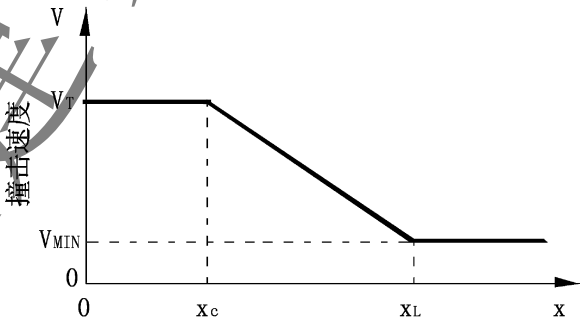

图 5.4.3　船舶撞击速度计算图示

图中：V ——船舶撞击速度；

V_T ——航道内的船舶典型通航速度；

V_{MIN} ——最小撞击速度（不小于年平均水流速度）；

x ——船舶距桥墩的距离；

x_c ——船舶距航道边缘的距离；

x_L ——离船舶航道中心线 3 的距离。

5.5　船舶撞击能量

5.5.1　船舶与桥墩正碰时，吸收的能量可按式(5.5.1)计算。

$$KE=500C_HMV^2 \qquad (5.5.1)$$

式中：KE ——为船舶撞击能量(J)；

重庆工程建设

M——为船舶的质量(t)；

V——为船舶的撞击速度(m/s)；

C_H——为水动力质量系数。

当船舶龙骨以下净空超过吃水深度的 1/2 时，C_H 取 1.05；当船舶龙骨以下净空小于吃水深度的 1/10 时，C_H 取 1.25；中间情况可以线性内插。

5.6 轮船对桥墩的撞击力

5.6.1 轮船与桥墩的正撞力可按下式计算。

$$F=\alpha_k \cdot \eta \cdot \xi \cdot (DWT)^{\beta_k} \cdot V \qquad (5.6.1\text{-}1)$$

在式中 k＝m、1、g，分别代表最大船撞力、局部平均船撞力和总体平均船撞力的系数。α_k、β_k 具体取值见表 5.6。

表 5.6.1 α_k、β_k 系数和取值

α_m	α_1	α_g	β_m	β_1	β_g
0.031	0.030	0.018	0.660	0.064	0.640

其中修正系数 η 和 ξ 可按下列公式计算。

$$\eta=\begin{cases}1-\exp\left(-\dfrac{6H}{H_s}\right) & H/H_s\leq 1.0\\ 1.0, & H/H_s>1.0\end{cases} \qquad (5.6.1\text{-}2)$$

$$\xi=0.8R^{0.068} \qquad (5.6.1\text{-}3)$$

式中：η——为承台厚度修正系数；

ξ——为承台圆弧半径修正系数(对于矩形承台可取 1.0)；

DWT——为船舶的恒重吨位(t)；

V——船舶的撞击速度(m/s)；

H——为船头与承台撞击时的叠加厚度(m)；

H_s——为船头高度(m)；

R——为圆形承台半径(m)。

5.7 轮船对桥梁上部结构的撞击力

5.7.1 船头对桥梁上部结构的撞击力可按下式计算。

$$F_{B,Sup}=\eta \cdot F \qquad (5.7.1)$$

式中：$F_{B,Sup}$——为轮船船头对桥梁上部结构的撞击力(MN)；

h——为船头与上部结构撞击时的叠加厚度(m)；

修正系数计算方法见式 5.6.2，撞击示意图示见图 5.7.1。

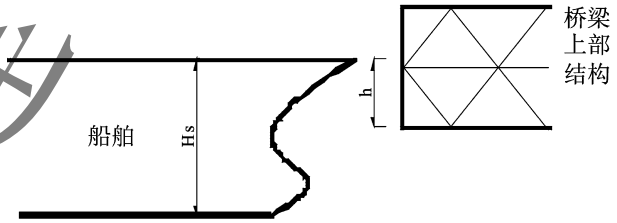

图 5.7.1 轮船与上部结构撞击示意图

5.7.2 驾驶舱对桥梁上部结构的撞击力可按下式计算。

$$F_{D,Sup}=\alpha_{D,Sup} \cdot F \qquad (5.7.2\text{-}1)$$

式中：$F_{D,Sup}$——为驾驶舱对桥梁上部结构的撞击力(MN)；

DWT——为船舶的恒重吨位(t)；

$\alpha_{D,Sup}$——为折减系数，可按下式计算。

$$\alpha_{D,Sup}=\begin{cases}0.2-0.1\times\dfrac{DWT}{100{,}00}, & DWT\leq 100{,}000\\ 0.1, & DWT>100{,}000\end{cases} \qquad (5.7.2\text{-}2)$$

5.7.3 桅杆对桥梁上部结构的撞击力可按下式计算。

$$F_{MT,Sup}=\alpha_{MT,Sup} \cdot F \qquad (5.7.3)$$

式中：$F_{MT,Sup}$——为桅杆对桥梁上部结构的撞击力(MN)；

$\alpha_{MT,Sup}$——为折减系数，没有专门研究的情况下取 0.1。

5.8 驳船对桥梁下部结构的撞击力

5.8.1 一条标准的底卸式驳船船头水平破损长度可按下式计算。

重庆工程建设

$$LB=3.1\times(\sqrt{1+1.3\times10^{-7}KE}-1) \qquad (5.8.1)$$

式中：LB——为驳船船头的破损长度(m)。

5.8.2 一条标准的底卸式驳船对桥梁下部结构的撞击力可按下式计算。

$$FB=\begin{cases}60.0LB, & LB<0.1m\\ 6.0+1.6LB, & LB\geq0.1m\end{cases} \qquad (5.8.2)$$

式中：FB——为等效静力驳船撞击力(MN)。

6 桥梁结构主动抗撞设计

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于桥梁上、下部结构抗船撞能力设计。

6.2 撞击荷载位置与方式

6.2.1 船舶撞击桥梁作用位置应取最高通航水位、最低通航水位和其他不利水位。

6.2.2 桥梁下部结构设计时，设计船撞力应作为等效静荷载作用在下部结构上，其作用方向为横桥向。纵桥向作用荷载取横桥向作用荷载的50%，且二者不能同时作用。力的作用方式应符合下列规定：

1 基础设计以及整体计算时，设计船撞力以集中力作用在下部结构上，计算图示见图6.2.2-1。

2 下部结构复核和局部设计时，设计船撞力应以竖向均布荷载沿船头高度范围作用在桥墩或下部结构上，计算图示见图6.2.2-2。对于驳船撞击，设计船撞力应以竖向均布荷载作用在船头厚度上，计算图示见图6.2.2-3。

重庆工程建设

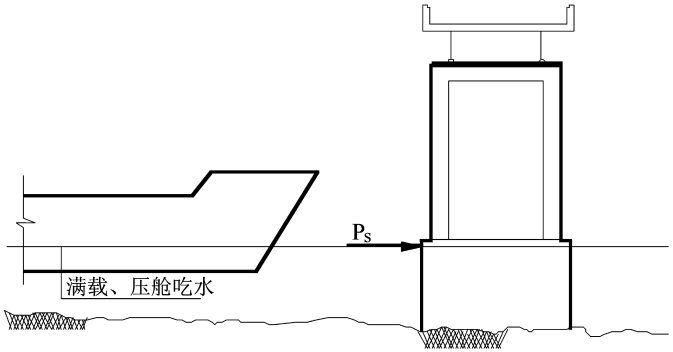

图 6.2.2-1　作用在墩上的轮船集中撞击力

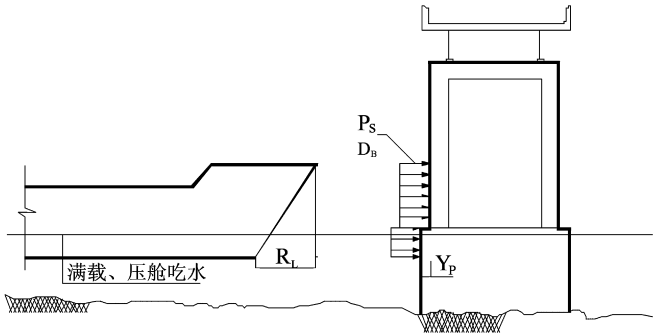

图 6.2.2-2　作用在墩上的轮船局部撞击力

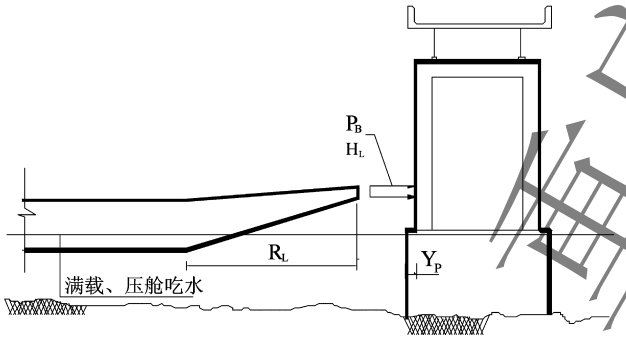

图 6.2.2-3　作用在墩上的驳船局部撞击力

6.2.3　当桥梁上部结构存在被船舶撞击风险时，船撞力应作为等效静荷载作用，其方向平行于航道中心线。

6.3　结构抗力计算要求

6.3.1　计算建模应考虑上、下部结构的整体关联性。

6.3.2　现场浇筑的钢筋混凝土桩、柱或预制混凝土桩、柱或圬工砌体，墩底、连接构件等的设计均应分别符合现行的有关钢筋混凝土结构和砌体结构的设计规范和本章第 6.5 节结构设计的相关要求。

6.3.3　钢结构构件和连接件的设计应符合现行的有关设计规范要求。

6.3.4　考虑到船舶撞击的短时性，下部结构抗力可根据实际工程经验适当提高。

6.3.5　当允许混凝土结构中出现塑性铰时，可参照《公路桥梁抗震设计细则》（*JTG/T B*02-01-2008）的规定进行设计，确保塑性饺的性能。

6.3.6　库区桥梁的冲刷深度应根据大桥所处的位置，分别按三峡工程常年回水区、三峡工程变动回水区和天然河道进行确定。

6.4　船舶撞击荷载组合

6.4.1　船舶撞击荷载组合可按本规程第 3.3 节相关要求执行。

6.5　下部构造要求

6.5.1　采用主动抗撞设计的桥墩宜采用实心断面，当选用空心断面时，应按船撞荷载要求对墩壁进行专门设计。

6.5.2　最高通航水位船舶撞击点以下的桥墩应选用实心断面。

重庆工程建设

6.5.3 下部结构采用高桩承台时，应尽量保证高水位时不撞墩，低水位时不撞桩，二者不能同时满足时，必须保证不撞桩。

6.5.4 受船舶撞击的桥墩和承台，其迎水侧和背水侧应设置分水尖。

6.5.5 桥墩顶部宜设置防落梁装置，防止船撞桥时发生落梁。

6.5.6 当桥墩受船舶侧向挤压时，宜加大盖梁宽度。

6.5.7 可能遭受船舶撞击的桥梁下部结构在结构构造上应具有一定的防撞赘余度。

7 桥梁被动防撞设施设计

7.1 一般规定

7.1.1 防撞设施的设计应达到降低船舶撞击力，部分（或完全）避免桥梁遭受船舶撞击而产生损伤的情形出现。

7.1.2 应对增强结构自身抗撞能力和采用附加防撞设施两种方案进行比较。一般情况下应首先采用增强结构自身抗撞能力的方案，若不可行或不合理，再考虑增加防撞设施。

7.1.3 附加防撞设施的采用，应使桥梁主体承受的船撞力下降到可以接受的水平。

7.1.4 防撞设施的结构构造及几何外形，应有利于改变船舶航向，大幅度消耗船撞动能，在保证桥梁安全的前提下对船舶的撞击损失尽可能小。

7.2 常用被动防撞设施原理与构成

7.2.1 桥墩防撞设施主要有一体式防撞设施、附着式防撞设施和独立式防撞设施。

7.2.2 一体式防撞设施主要包括：

1 可采用一体式防撞钢套箱，钢套箱和桥梁基础结合在一起，钢套箱不能随水位发生上下位移，主要靠钢材的塑性变形和破损来吸收撞击能量，减小船舶对桥墩的撞击力。

2 可采用人工岛，在桥墩的周围构筑一个小岛以防止船舶撞击到桥墩。

7.2.3 附着式防撞设施主要包括：

1 可采用附着式防撞护舷，护舷安装在承台或墩身侧面，主

重庆工程建设

要起缓冲和均匀分布船撞力的作用。

2 可采用附着式防撞绳索，将钢丝绳通过支撑固定在桥墩上，并在桥墩附近水面水平地展铺，当船舶冲撞时，由钢丝绳的弹性变形吸收冲撞能量。

3 可采用附着式防撞木结构，靠木材的压溃来吸收撞击能量，可以安装在承台上直接抵御船舶的撞击，也可以设置在其他防撞设施（如围堰、混凝土箱、防护板防护系统）上，既能防止船体与防撞设施摩擦产生火花，也可以减小船体损伤。

4 可采用附着式防撞重力摆，利用摩擦阻力或重力产生复原力的方式来吸收撞击能量，同时也可借助流体效应，靠防撞装置周围水的运动来吸收撞击能量。

5 可采用附着式防撞混凝土套箱，套箱一般安装在承台周围，主要靠混凝土套箱的压溃变形来吸收能量，减小船舶对桥墩的撞击力。

6 可采用附着式防撞钢套箱，钢套箱一般安装在承台或桥墩周围，并能随水位发生上下浮动，主要靠钢材的塑性变形和破损来吸收撞击能量，减小船舶对桥墩的撞击力。

7.2.4 独立式防撞设施主要包括：

1 可采用集群式护墩桩，可独立于桥墩进行设置，由于船撞产生很大的冲击荷载，导致桩结构塑性变形和压碎，使船在不撞到桥墩之前就被止住。

2 可采用独立式防撞墩，一般设置在桥墩的上游和下游，防撞墩可以分为柔性和刚性两种。柔性防撞墩一般采用钢管桩或钢管混凝土桩，这种防撞设施会发生较大的变形，对船舶的破坏较小。刚性防撞墩一般采用预应力混凝土桩或钻孔灌注桩，主要靠船艏变形来吸收撞击能量。

3 可采用薄壳筑砂围堰防撞设施，一般采用圆柱形结构，内部用混凝土或松散的材料填充，起到抵御或缓冲船撞力的作用。

7.3 三峡库区跨江桥梁被动防撞设施

7.3.1 可采用附着式浮式防撞钢套箱，分滑动摩擦式防撞钢套箱和滚动摩擦式防撞钢套箱两种。滑动摩擦式防撞钢套箱因其内部与桥墩外表面接触处安装有多块减磨、耐磨元件，在水位变化的情况下，可沿桥墩外表面滑动升降。滚动摩擦式防撞钢套箱与桥墩外表面接触处安装有滚轮装置，在水位变化的情况下，可沿桥墩外表面滚动升降，以滚动摩擦代替滑动摩擦。

7.3.2 可采用分离式系泊索，将钢丝绳通过锚碇系统锚固于江底，然后在钢丝绳上连接多个防撞消能组件，如橡胶浮筒、复合材料浮筒等，当船舶冲撞时，通过钢丝绳和浮筒的弹性变形来缓冲船撞力。

7.3.3 也少采用其他类型防撞设施，可根据本规程第7.2节的防撞设施，可通过进一步组合或改进，以满足三峡库区水文特征的防撞需求。

7.4 被动防撞设施的设计要求

7.4.1 选择被动防撞设施时应将结构所受船撞力降低到设防标准以下。

7.4.2 被动防撞设施的形状及船撞力确定应采用设计代表船舶进行控制。

7.4.3 被动防撞设施的计算应采用动力数值模拟方法。

7.4.4 船舶撞击荷载组合可按3.3节相关要求执行。

7.4.5 采用具有消能作用的防撞装置时，应进行材料或消能构件的性能试验。

重庆工程设计

附录 A　方法 II 年碰撞频率计算方法

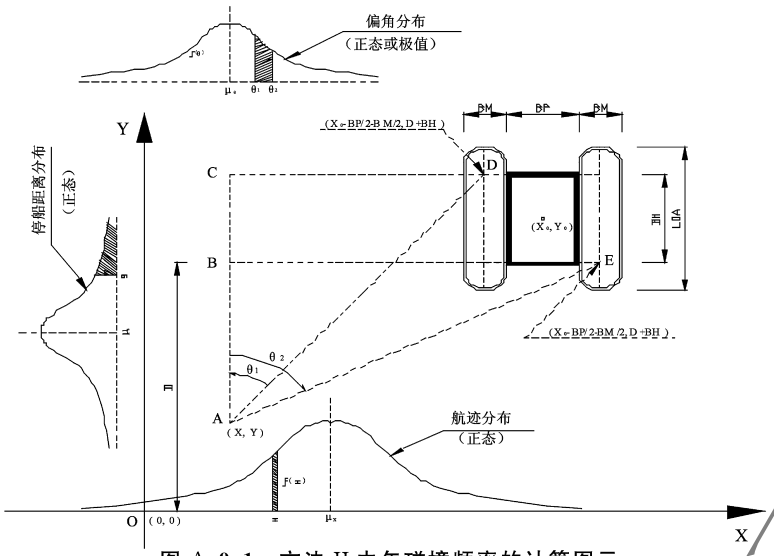

图 A.0.1　方法 II 中年碰撞频率的计算图示

$$P_c=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i P_{wi} \tag{A-1}$$

$$P_{wi}=\sum_{j=1}^{m}N_j\int_{\mu_x-3\sigma_x}^{\mu_x+3\sigma_x}f(x)\int_0^D\lambda(s)[1-F(s)]\int_{\theta_1}^{\theta_2}f(\theta)d\theta ds dx \tag{A-2}$$

式中：P_c ——桥梁的年碰撞频率；

α_i ——第 i 种水位出现的频率；

n ——水位个数；

m ——船舶分类组数；

P_{wi} ——第种水位下的年碰撞频率；

N_j ——按船舶分类方法第 j 种船舶的年通航量，艘次；

$f(x)$ ——航迹横向分布（几何分布）密度函数；

D ——积分路径长度；

$\lambda(s)$ ——船舶单位航行距离的失误概率；

$F(s)$ ——停住船的概率；

$f(\theta)$ ——船舶偏航角分布密度函数。

μ_x ——船舶的航迹横向分布（几何分布）均值；

σ_x ——船舶的航迹横向分布（几何分布）标准差。

$f(x)$、$f(\theta)$、$F(s)$ 分别如下：

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$f(\theta)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta}e^{-\frac{(\theta-\mu_\theta)^2}{2\sigma_\theta^2}}$$

$$F(s)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}e^{-\frac{(s-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}}$$

$$F(s)=\int_{\mu_s-3\sigma_s}^{s}f(s)ds$$

模型中的积分上下限 θ_1、θ_2，可按以下情况计算：

(1)当船舶位于图中 A 区时，即当 $X<X_0-\frac{BP}{2}-\frac{BM}{2}$ 时：

$$tg\theta_1=\frac{X_0-\frac{BP}{2}-\frac{BM}{2}-X}{D-Y+BH}$$

$$tg\theta_2=\frac{X_0+\frac{BP}{2}+\frac{BM}{2}-X}{D-Y} \tag{A-3}$$

(2)当船舶位于图中 B 区时，即当 $X_0-\frac{BP}{2}-\frac{BM}{2}<X<X_0+\frac{BP}{2}+\frac{BM}{2}$ 时：

$$\mathrm{tg}\theta_1=\frac{X_0-\frac{BP}{2}-\frac{BM}{2}-X}{D-Y}$$

重庆工程建设

$$\mathrm{tg}\theta_2=\frac{\mathrm{X_0}+\frac{\mathrm{BP}}{2}+\frac{\mathrm{BM}}{2}-\mathrm{X}}{\mathrm{D}-\mathrm{Y}} \qquad (A\text{-}4)$$

(3)当船舶位于图中 C 区时，即当 $X>X_0+\frac{BP}{2}+\frac{BM}{2}$ 时：

$$tg\theta_1=\frac{X-X_0-\frac{BP}{2}-\frac{BM}{2}}{D-Y+BH}$$

$$tg\theta_2=\frac{X-X_0+\frac{BP}{2}+\frac{BM}{2}-X}{D-Y} \qquad (A\text{-}5)$$

式中：X ——航迹的横向分布坐标；

X_0 ——桥墩的 X 轴坐标；

BP ——桥墩宽度；

BM ——船舶宽度。

本指南用词说明

1.0.1 为便于执行本指南条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的：

正面词采用“可”；反面词采用“不可”。

1.0.2 条文中指明应按其他有关标准执行时写法为：“应按……执行”或“应符合……的要求”。非必须按所制定的标准执行时，写法为“可参照……执行”。

重庆工程建设

重庆市工程建设标准

重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南

DBJ/T50-106-2010

条文说明

重庆工程建设

2010 重 庆

目　次

1　总　则 …… 33
3　准则与方法 …… 36
3.1　设防水准及性能要求 …… 36
3.2　设计船撞力与设计代表船舶 …… 37
3.3　船舶撞击荷载组合 …… 48
4　一般规定 …… 49
4.1　基础资料收集 …… 49
4.2　通航条件 …… 49
4.3　桥位与桥跨 …… 50
4.4　通航孔与非通航孔 …… 52
4.5　船舶 …… 53
4.6　防撞设施 …… 55
4.7　航行监测与预警 …… 56
5　船舶撞击力估算方法 …… 57
5.1　一般规定 …… 57
5.2　船舶撞击的范围 …… 58
5.3　最小撞击力要求 …… 58
5.4　船舶撞击速度 …… 59
5.5　船舶撞击能量 …… 60
5.6　轮船对桥墩的撞击力 …… 62
5.7　轮船对桥梁上部结构的撞击力 …… 65
5.8　驳船对桥梁下部结构的撞击力 …… 67
6　桥梁结构主动抗撞设计 …… 69
6.1　一般规定 …… 69
6.2　撞击荷载位置与方式 …… 69
6.3　结构抗力计算要求 …… 71
6.5　下部构造要求 …… 73
7　桥梁被动防撞设施设计 …… 74
7.1　一般规定 …… 74
7.2　常用被动防撞设施原理与构成 …… 74
7.3　三峡库区跨江桥梁被动防撞设施 …… 77
7.4　被动防撞设施的设计要求 …… 78

重庆工程建设

1 总 则

1.0.1 目前仅重庆市在III级航道及以上河流航道已建成或在建桥梁为101座，其中长江上的桥梁有29座，嘉陵江上的桥梁有21座，乌江上的桥梁有20座，其他支流上的桥梁31座；桥梁形式也多种多样，涉及斜拉桥、悬索桥、拱桥、连续刚构桥、连续梁桥等多种桥型。此外，为进一步加强长江两岸的陆上运输，交通部计划在2020年以前还将新修52座长江大桥，其中包括重庆22座、江苏9座、安徽7座等。根据规划，重庆市在未来几年，长江上还将新建鱼嘴大桥、郭家沱大桥、黄桷沱大桥、东水门大桥、白居寺大桥、观音岩大桥、西彭大桥7座桥梁，嘉陵江上还将新建水土大桥、悦来大桥、礼嘉大桥、双碑大桥、红岩村大桥、千厮门大桥6座桥梁。预计在2020年前重庆主城9区的桥梁将不少于30座。如此众多的桥梁，其船撞风险已不容忽视。

由于三峡大坝的建成，库区水面变宽，航道变深，水流速度变缓，干支联通，航道通航能力明显增加；船舶吨位的加大、通航密度的不断增大、加上库区通航水位的大幅提高等因素导致船舶与桥墩撞击点的大幅上升，加大了库区跨江大桥受船舶撞击倒塌的风险。而我国一般江河桥梁船桥撞击设计都是参考一些发达国家编写的相关规范条文，如美国AASHTO的《公路桥梁船撞设计指南》(2009)和美国铁路工程协会(AREA)的《防撞保护系统设计规范》。但国外规范毕竟有许多不符合我国实际情况的因素，这在很大程度上制约了我国的桥梁船撞设计。为此，结合目前国际上通用的风险设计思想，开展桥梁船撞研究，并形成规范性文件，以指导重庆市跨江桥梁的船撞设计，具有重大的现实意义。

1.0.2 根据三峡库区独特的航道大水位落差、高桥墩，及蓄水后

通航能力大大提高的现状而制定的本指南，其标准化船型撞桥的可能性和后果，以及船撞桥内部机理，同样适合川江航运和桥梁安全的桥墩防撞措施标准。

1.0.3 为适应三峡库区长江航运的快速增长，交通部发布公告，要求自2004年12月1日起，三峡库区标准船型主要经济技术条件及尺度，必须严格遵守交通部公布的《川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列》中的规定，随意建造的非标准化船型不得在川江及三峡库区航行，在库区公布的最大单船为5000吨级的干散货船，总重量接近长江中下游的5000吨海轮，目前库区实际在运营和建造的机动单船达6500吨。

1.0.4 国内外统计资料表明，近几十年来，世界上发生的船舶撞毁桥梁事故已超过100次，在通航的大型桥梁运营期间，约有10%的桥梁因船舶撞击而倒塌。

在国内，武汉长江大桥自1957年建成通车以来，四十几年内被撞70余次，除三次是超高撞梁外，其余均撞桥墩，最严重的一次留下了0.15m的深凹痕；黄石长江公路大桥在三年时间内共发生碰撞桥墩事故20多起，其中一次船毁人伤，货物沉没，桥墩受损，直接经济损失上千万元。

在国外，最新的一次比较严重的船桥碰撞事故发生在2002年5月26日，位于美国的俄克拉荷马城东部100英里，距离阿肯色州西部约35英里的一座横跨阿肯色河的公路桥被一艘驳船撞塌，至少9辆汽车掉入河中，12人困在车厢里，造成了人员的伤亡。

鉴于船撞桥问题的严重性，目前世界各国和地区已针对该问题进行了大量的研究，设计并设置桥梁的防撞保护装置。而这是一笔不小的工程投资，在初步估算中应考虑到总投资中。

船撞桥是偶发事件，既然是偶发事件，就有发生几率的问题。例如，对于通过桥梁的船舶来说，10000个过桥航次碰撞一次，又或者100000个过桥航次碰撞一次。但当船舶一旦碰上桥墩，那

重庆工程建设

么船舶对桥梁的撞击力便不再随几率而变，而与碰撞船舶的质量、碰撞速度、碰撞角度、船头刚度等有关，同时也与被撞桥墩的刚度、防撞装置的刚度等有关，也就是说，桥梁的安全裕度不再与碰撞几率有关，而与船舶、桥墩本身的特性有关。因此，进行桥梁船舶撞击风险评估可对桥梁的船撞倒塌风险进行分析，明确桥梁所处的风险水平，并可辅助确定桥梁船撞设计中的设计代表船舶和设计船撞力，对我国新建的内河桥梁以及跨海湾大桥的船撞设计提供技术支持。

1.0.5 千古以来在川江上建跨江大桥均是“水急滩险”的状况，江面狭窄水流急，过去建设的桥梁桥墩一般都放置于岸边，即使是在洪水的季节也不会被船撞击；建库过程中修建的桥梁考虑了库区形成后水面变宽的影响，大量的桥梁建设成一跨过江，墩放置在岸上，少量的桥梁桥墩置于非通航孔或浅水区。面对水位落差达到三十米的库区，对于不同时期的桥梁必须采取不同的防撞措施，即过去的桥梁多采用主动抗撞，后期修建的桥梁则多采用被动防撞或综合防撞措施，以实现对桥梁、船舶的双重保护。

防撞措施设计主要包括：主动抗撞设计、被动防撞设计和更改桥梁设计。主动抗撞是指为了避免船舶在航行过程中撞击到桥梁而采取的一系列人为改善措施，如对桥下通航船舶的引导和警告等。被动防撞设计是指对一些特别重要的桥梁加设防撞装置。

1.0.6 一座大桥的设计涉及相关因素和规范很多，本指南只指出了桥梁的船撞设计或加固设计，局部内容尚属地方标准，故三峡库区桥梁的船撞设计与加固还应符合国家以及重庆市现行有关强制性标准和其它相关设计标准的规定。

3 准则与方法

3.1 设防水准及性能要求

3.1.1～3.1.2 桥梁的船撞设防水准与桥梁的重要性保持一致。在本指南中，参考桥梁与建筑抗震设计规范，以及美国 AASHTO 的《桥梁船撞设计指南》等，将桥梁船撞设防类别划分为 A、B、C 三类。

桥梁船撞重要性等级的划分考虑了桥梁的重要性、航道的重要性以及严重船撞桥梁事故发生导致的潜在不利后果的严重程度。一般来说，I 级～III 级航道跨越的水域宽阔、水深较深，桥梁跨度一般较大、水中桥墩的数目一般较多。而跨越 I 级～III 级航道修建的公路桥梁，也就是跨越繁忙宽阔水域的桥梁一般为重要公路或市政道路上的咽喉工程，具有很高的重要性。考虑到上述因素，跨越 I 级～III 级航道的桥梁一旦发生严重的船撞事故，各方面的损失也将是极为严重的。此类桥梁划分为 A 类桥梁。

IV 级及以下航道上的桥梁，桥下航行的船舶数量相对较少，且通航船舶的吨位一般也较小，桥梁跨越的河流宽度一般不宽，基于现代桥梁设计理念与建造技术，如果为新建重要公路上的桥梁，则一般会考虑一跨过河，或采用跨度较大的桥梁跨度布置，桥梁基础抗撞能力相对较大，桥梁受到船舶撞击产生的不利后果较小。考虑航道和桥梁两方面因素，将其划分为 C 类。

II、III、IV 级航道上的其他各类桥梁，其重要性也有差别，但重要性介于 A 类和 C 类之间，从规范编制方面考虑，统一将它们划分为 B 类。

3.1.3 本指南总体思想是基于风险分析的决策。在满足公众对交通基础设施安全性一般要求的基础上，桥梁业主应当拥有综合确定船撞性能目标要求的权利和责任。但考虑到我国的习惯，以

重庆工程建设

及对公众安全的基本保护，本指南建议了一个基本的桥梁船撞性能要求，作为最低的性能要求。桥梁业主提出的性能要求一般不应低于这个最低要求。

3.1.4 本指南建议了三种确定桥梁船撞设防标准的方法，即船舶撞击事故发生的重现期方法，目标极限状态概率法和成本-效益分析方法。一般情况下建议采用目标极限状态概率法。对于水中有很多桥墩或旧桥加固的情况可考虑采用成本-效益分析方法，亦或重现期方法和目标极限状态概率法在经济上或技术上明显不合理时，应首先考虑采用成本-效益分析方法。

考虑到桥梁船撞经济损失的评价目前还缺乏基本的研究，因此采用成本-效益分析方法时应进行专门研究。

3.2 设计船撞力与设计代表船舶

3.2.1～3.2.2 本指南提供了四种确定设计船撞力和设计代表船舶的方法。

方法 I 在选择设计代表船舶时是一种半确定性的分析程序。方法 I 的目的是提供一种简便的，保守的方法来选择设计代表船舶，而不用进行大量的计算分析工作。

方法 II 是基于桥梁船撞概率来选择设计代表船舶的方法。在使用时，首先要进行桥梁的船撞概率计算，获得桥梁的年碰撞频率，然后根据 3.1 节桥梁设防水准中重现期的要求，确定设计代表船舶。

方法 III 是基于桥梁结构损伤概率来选择设计代表船舶的方法。在使用时，首先要进行桥梁的年碰撞频率计算，然后进行桥梁结构的失效概率计算，获得桥梁的年失效概率，然后根据 3.1 节桥梁设防水准中目标失效概率的要求，确定设计代表船舶。

方法 IV 是在前述三种方法导致不经济或技术上不可行的情况下采用。如对既有桥梁进行船撞加固以及宽阔水域中很多桥

梁构件存在被船舶撞击风险的情况等。

3.2.3 1～3 目前，国内外应用较多的几种桥梁船撞概率计算模型有：

1 AASHTO 规范模型；

2 拉森(O. D. Larsen)模型；

3 欧洲规范模型；

4 KUNZI 模型；

5 黄平明直航路模型。

各种模型的具体介绍可参见相关文献，这里就不再赘述了。

拉森模型和 AASHTO 模型基本相同，基础都是 Macduff 和 Fujii 提出的碰撞概率模型。两者都是在考虑了船桥碰撞的因果概率和几何概率的基础上提出的。

AASHTO 模型是目前应用最为广泛的船桥碰撞概率计算模型，原因在于其方法完善，应用也相对简单，实用性较强。AASHTO 模型计算碰撞概率的基本思路可以理解为，首先确定出几何概率(图 3.2.3-1 中 B 区)，然后再乘以船舶由于偏航而驶入 B 区的概率，即船舶的偏航概率(由 A 区驶入 B 区的概率)，且船舶一旦驶入 B 区，这种状态就会一直维持到发生事故。确定的最合理的方法是进行长期的事故统计，在缺乏统计资料的前提下，AASHTO 给出了的估算经验公式，但并未包括诸如风、能见度条件、助航设备等影响因素的影响。

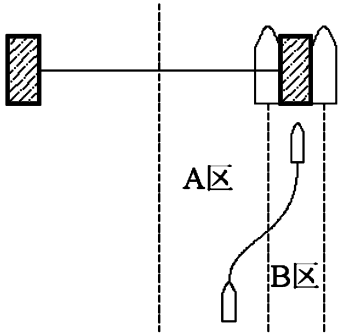

图 3.2.3-1 AASHTO 模型计算图示

南京工程学院

KUNZI 模型和欧洲规范模型的计算思路基本相似。欧洲规范模型考虑了船舶在桥区的横向分布（又称几何分布，下同）、所处位置对事故的影响以及单位航程事故率的变化，理论推导方面较为严谨，但由于在计算时缺乏较为合理的定量表达方式，因此其还只是一个理论上的表述。KUNZI 模型则进一步明确了的计算方法，提出了偏航角和停船距离这两个随机变量，并给出了相应的计算公式，但 KUNZI 模型只是针对船舶的单条航迹给出了碰撞概率的计算方法，而在实际中，船舶在横向上存在一定的航迹分布，不同航迹线上的船舶按 KUNZI 模型计算出的碰撞概率是不同的，要想得到真实的碰撞概率还要将 KUNZI 模型的计算结果在船舶的横向分布上进行积分。因此，KUNZI 模型与欧洲规范模型相比，既有其表达具体的一面，但同时又忽视了实际中船舶的横向分布，对计算结果造成了一定的偏差。

在模型参数方面，经过比较上述船撞概率计算模型可以发现，最具代表性的模型有两种：AASHTO 规范模型和 KUNZI 模型。其中，AASHTO 模型计算公式为经验公式，且其中的参数大多为统计型参数，参数取值是根据美国内河的统计数据而来，能否直接用于我国的内河桥梁船撞设计尚存疑问。而 KUNZI 模型则提供了理论推导相对较为完善的计算模型，只是模型参数的确定尚需根据实际情况而定，如船舶的偏航角度、船舶的横向航迹分布和船舶的停船距离分布。这些参数可以根据具体河流通航情况进行观测而定。总体上看，AASHTO 模型采用来表征撞击区域，然后用偏航概率 PA 进行修正；KUNZI 模型采用 $W_1(s)$ 来表征撞击区域，然后用 $\lambda(s)$ 和 $W_2(s)$ 进行修正。AASHTO 模型忽略了停船因素的影响，采用了一个综合影响系数，也即偏航概率 PA 来进行了考虑。KUNZI 模型则从船舶的航行过程入手，采用一个有序积分来计算碰撞概率，实际意义较 AASHTO 模型更为明确，不足之处在于忽略了船舶的横向分布。

再者，上述所有模型都没有反映出水位变化对碰撞概率的影响，即在计算过程中，无论采用高水位时桥墩处的水深还是低水位时桥墩处的水深，其计算出的碰撞概率是相同的，这与实际情况是不符的。合理的做法是首先计算出不同水位下的年碰撞频率，然后再根据不同水位出现的频率对各个年碰撞频率进行加权求和，这样才得到了合理的桥墩的年碰撞频率。

通过上述的对比分析，我们发现，如果采用 AASHTO 规范模型的思路，那么我们就需要针对我国内河船舶事故的具体情况做大量的数据统计工作，而目前我国在这方面开展的工作还是比较有限的。而 KUNZI 模型则提供了一套较完备的数学模型的研究思路，并且参数确定方面较 AASHTO 模型中大量的经验系数来说相对简单，因此本指南针对 KUNZI 模型中的不足之处，提出了三概率参数积分路径模型。三概率参数积分路径模型具有以下两个特点：

1）考虑了水位变化频率对碰撞概率的影响，即对于某一计算水位下的碰撞频率还应乘上该水位出现的年频率，然后根据水位情况加权求和，使计算方法更加符合实际情况。

2）在 KUNZI 模型的基础上，增加一项积分来考虑船舶横向分布（几何分布）对碰撞概率的影响，使模型的理论推导更加符合实际情况。

在三概率参数积分路径模型里面，所需要的参数见表 C3.2.3-1。其中，桥梁参数可通过桥梁设计资料得到，船舶参数中的船舶宽度可由前述的船舶分类方法得到。

需要通过实际观测确定的模型参数包括：船舶航迹横向（几何）分布均值、船舶航迹横向（几何）分布标准差、船舶偏航角均值、船舶偏航角标准差。目前，在船舶的航迹横向分布概率模型方面，国内外大都采用正态分布来描述，但对于正态分布的参数取值却差别较大；在船舶的偏航角度概率模型方面，国内外尚无实际的观测资料可用，大都采用假设的正态分布模型，且均值存在较大的争议。因此，对于某一具体桥梁，如果有条件可以进行

船舶工程设计

实际观测，以获取更加符合工程实际的数据。

此外，所需参数还包括：船舶停船距离均值、船舶停船距离标准差和船舶单位航程事故率。船舶的停船距离是由船型和水流速度决定的，最好能根据专门的试验数据来进行统计确定，如无实测数据可用，KUNZI 模型建议，对于大型船舶，停船距离均值约为 550m，标准差约为 60m，并建议根据航海专家的意见确定不同尺度船舶的停船距离均值和标准差。对于船舶单位航程的事故率，可预先收集桥区上下游一定范围内的船舶事故数，然后除以每年的总船舶数以及航道总长度便可得到船舶单位航程的事故率。由于不同的航段，航道的通航状况也不尽相同，因此船舶事故率也会有所差别，本指南建议对不同河段的桥梁，最好能进行历年船舶事故的统计以确定船舶单位航程的事故率。

表 3.2.3-1　三概率参数积分路径模型所需参数

编号	船舶参数	编号	桥梁参数
1	船舶宽度	9	桥墩位置
2	船舶航迹均值	10	桥墩顺桥向长
3	船舶航迹方差	11	桥墩横桥向长
4	船舶偏航角均值		
5	船舶偏航角方差		
6	船舶停船距离均值		
7	船舶停船距离方差		
8	船舶单位航程事故率		

4　费用-效益分析方法是基于将桥梁加固和防护措施的费用，与减低风险所得到的效益相比较，从广义造价最低的原则进行桥梁船撞设计。该方法主要是从项目投资企业或建设单位的角度出发，为项目投资与决策提供参考依据。一般来说，桥梁的船撞设防投资越高，船撞事故引发的损失也越小。然而极端的船撞事故比较罕见，而社会资源具有有限性，因而必须制定合理的设防

设计标准，便于决策者们对社会中有限的资源分配作出决定。

大多数国家的规范允许结构物在极端荷载下因为功能失效而导致人员伤亡以及经济损失，这并不意味着这样的做法不合理，因为设防时应综合考虑：(1)生命安全；(2)控制破坏；(3)结构可靠；(4)最小使用期成本四点因素。由于上述四点是相关联的，即结构的初始造价越高，结构的可靠性越高，生命安全的保障越高，受灾后的损失越小。由此可知，为确定目标失效概率而采用的方法应不仅包括结构的初始造价，而且应包括结构物受灾后的损失值。现今广泛使用的费用－效益方法，不仅考虑了结构的初始造价(费用)，而且考虑了结构受灾后的损失减少(收益)。

我国学者罗荃通过对钢筋混凝土桥梁抗震广义造价进行研究，提出了桥梁单体广义总造价的计算方法，其表达式为：

$$E(C_T)=C_1+C_A+C_B=C_1+C_D \qquad (3.2.3\text{-}1)$$

式中：C_T——为桥梁单体广义总造价；

C_I——为桥梁初始造价；

C_A——为直接经济损失；

C_B——为间接经济损失；

C_D——为总经济损失。

它们之间的关系见图 3.2.3-2。

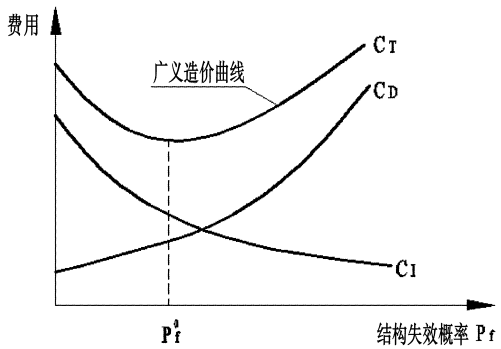

图 3.2.3-2　广义造价曲线

此外，美国 AASHTO 船撞设计指南对于使用目标风险准则

重庆工程学院

不足以满足可接受风险水平的桥梁，采用方法Ⅲ进行分析。这些情况包括跨越很宽水道而使很多墩都可能受到船舶撞击的桥梁或墩位于深水处的桥梁或未经船撞设计而需要加固的旧桥。对于这些情况，可以考虑采用费用－效益分析，由风险收益与降低风险所需成本进行比较。图 3.2.3-3 显示了在风险和降低风险所需费用间的关系。

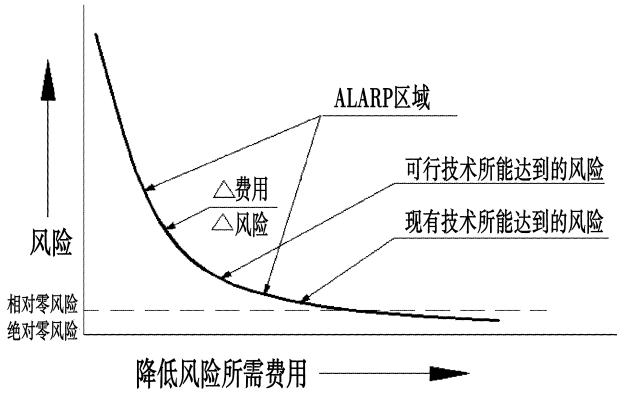

图 3.2.3-3　美国 AASHTO 船撞设计指南的风险收益分析

方法Ⅲ是基于费用－效益分析来确定桥梁防撞设计代表船舶的方法。根据 Sexsmith 的研究，未来某个时间因船舶撞击桥梁而产生的损失为：

$$PW=(DA)e^{-it} \tag{3.2.3-2}$$

式中：PW ——未来损失的现值；

DA——未来中断损失的现值；

i——为折扣率；

t——为发生损失的时间。

Sexsmith 认为发生了一次灾难性船撞桥事故以后，对于同一桥梁又发生了第二次灾难性船撞桥事故所造成的损失现值与第一次事故所造成的损失现值相比可忽略。因此，Sexsmith 建议在计算船舶撞击造成的风险损失时，可只考虑第一次发生的灾难性事故。

因为损失发生的时间是一个随机变量，Sexsmith 假定其为泊松过程，则基于 3.2.3-2 有：

$$PW=DA\int e^{-it}f(t)dt \tag{3.2.3-3}$$

式中：$f(t)$ ——关于 t 的概率密度函数，

t ——桥梁倒塌的发生时刻。

$$f(t)=(AF)e^{-(AF)t} \tag{3.2.3-4}$$

式中：AF ——费用参数（桥梁的年倒塌频率）。于是：

$$PW=DA\int e^{-it}(AF)e^{-(AF)T} \tag{3.2.3-5}$$

进一步得到：

$$PW=\frac{AF(DA)}{(AF+i)} \tag{3.2.3-6}$$

Leslie 进行了与 Sexsmith 相似的研究，但在计算现值时考虑了增长因子 g，增长因子代表了中断费用增长的实际年率。桥梁使用期内的中断费用的增长一般是船舶交通量增大的结果（导致 AF 和港口中断费用的增长），或是通过桥梁的汽车数量的增长（导致车辆中断费用的增长）。引入中断费用增长因子 g 后，AASHTO 规范得到的损失计算式为：

$$PW=\frac{AF(DA)}{(AF+i-g)} \tag{3.2.3-7}$$

式（C3.2.3-7）只适用于较小的 g 值（$g\leq i/5$），美国一些事故的经验表明值总在 1%～4%之间。增长率可由下式确定：

$$g=[(PW_F/PW_C)^{1/n}-1] \tag{3.2.3-8}$$

式中：PW_c，PW_F ——分别为当前和未来可避免中断费用的现值，

n ——年数（通常是桥梁的使用寿命）。

折扣率 i 一般由桥梁业主确定，在费用－效益分析中，为考虑值变化的影响，一般会考虑 i 的一个变化范围。按照 AASHTO 规范计算 alternative 公路项目时，i 取值为 4%，美国其他联邦和州政府则使用介于 5%和 10%间的折扣率。

对于中断费用，AASHTO 规范给出了下述计算公式：

$$DC=PRC+SRC+MIC+PIC \tag{3.2.3-9}$$

重庆工程建设

式中：DC——中断费用；

PRC——桥墩重建费用；

SRC——上部结构重建费用；

MIC——车辆行驶延迟导致的损失；

PIC——是港口业务的损失。

表 3.2.3-2 给出了 Dame Point 桥（主跨 1300feet 的斜拉桥）其中一个主桥墩倒塌时的中断费用的估计，可见 MIC 在其中所占的份额非常大。

表 3.2.3-2　Dame Point 桥中断费用的估计

损失项目	中断费用（安 1984 年不变价格计算，美圆）	
	1987	2037
PRC	8,948,000	8,948,000
SRC	27,038,000	27,038,000
PIC	21,000,000	21,000,000
MIC	75,810,000	375,480,000
DC	132,797,987	432,468,037

近年来，设备安全成本（Implied Cost of Averting a Fatality，$ICAF$）的概念得到了广泛的应用，$ICAF$ 是指避免一个人死亡所需的成本。$ICAF$ 越低，表明风险减小措施越符合低成本高收益的原则，即所花费的单位货币可以挽救更多人的生命。通过比较各种风险降低措施的值，决策人员就能够在既定费用的基础上选择一个最为合理的风险控制方法。$ICAF$ 可看作是一个社会在其伦理框架和生产能力水平下，拯救一个生命所能承受的最大费用，即生命价值。

1997 年，Nathwani 基于人均国民生产总之和平均寿命这两个已有的社会生活评价指标，提出了生活质量指数 LQI（Life Quality Index），随后，Rockwitz、Faber 等学者对其进行了深入研究，建立了基于 LQI 的人的生命价值计算模型。通过将 $ICAF$ 与 LQI 相结合，得到避免单位人员死亡的潜在成本为：

$$ICAF=\frac{ge(1-w)}{4w} \tag{3.2.3-10}$$

式中：g——国内生产总值；

e——人的寿命，发展中国家 $e=56a$，中等发达国家 $e=67a$，发达国家 $e=73a$；

w——人工作时间与生命时间的比值，发达国家 $w=1/8$。

也有文献将 $ICAF$ 定义为：

$$ICAF=\frac{\Delta\text{费用}}{\Delta\text{风险}} \tag{3.2.3-11}$$

这里的风险用年死亡人数来衡量，表 3.2.3-3 列出了各种文献规定的 ICAF 值。

表 3.2.3-3　风险接受准则的 ICAF 值（以年死亡人数衡量）

行业	海洋工业	船舶	工业安全	火车	轻轨	地铁
ICAF（百万美圆）	3.1	3.0	≥1.6	1.0 1.6 2.5	4.1	3.1

2004 年，Pandey 基于上述研究提出了基于社会支付意愿 SWTP（Social Willing To Pay）的决策方法，后我国学者阮欣又将该方法引入了桥梁的公共安全风险评估中，根据阮欣的研究，我国各个地区的 $ICAF$ 值见表 3.2.3-4。

表 3.2.3-4　我国各个地区的 ICAF 值（根据 2003 年我国人均 GDP 数据）

地区	人均 GDP（元）	人均寿命（年）	ICAF（万元）	地区	人均 GDP（元）	人均寿命（年）	ICAF（万元）
北京	32061	76.1	102.76	湖北	9011	71.08	26.97
天津	26532	74.91	83.71	湖南	7554	70.66	22.48
河北	10513	72.54	32.12	广东	17213	73.27	53.12
山西	7435	71.65	22.44	广西	5969	71.29	17.92
内蒙古	8975	69.87	26.41	海南	8316	72.92	25.54
辽宁	14258	73.34	44.04	重庆	7209	71.73	21.78
吉林	9338	73.1	28.75	四川	6418	71.2	19.25
黑龙江	11615	72.37	35.4	贵州	3603	65.96	10.01
上海	46718	78.14	153.74	云南	5662	65.49	15.62

重庆工程学院

地区	人均 GDP（元）	人均寿命（年）	ICAF（万元）	地区	人均 GDP（元）	人均寿命（年）	ICAF（万元）
江苏	16809	73.91	52.32	西藏	6871	64.37	18.63
浙江	20147	74.7	63.38	陕西	6480	70.07	19.12
安徽	6455	71.85	19.53	甘肃	5022	67.47	14.27
福建	14979	72.55	45.77	青海	7277	66.03	20.24
江西	6678	68.95	19.39	宁夏	6691	70.17	19.77
山东	13661	73.92	42.53	新疆	9700	67.41	27.54
河南	7570	71.54	22.81	全国	9101	68.55	26.27

综上，对于我国桥梁船撞设计的最优费用准则，我们可以从两个方面进行考虑，一是为了降低风险需要投入的费用 *Cost*，二是事故一旦发生可能造成的损失 *Loss*（包括经济损失 LE 和人员伤亡损失 LF）。

对于可能的经济损失 *LE* 我们可以采用式(3.2.3-12)和式(3.2.3-13)进行计算，即：

$$LE=\frac{AF(DA)}{(AF+i-g)} \tag{3.2.3-12}$$

$$DA=PRC+SRC+MIC+PIC \tag{3.2.3-13}$$

式中：*LE* ——为事故导致的经济损失；

PRC——为桥墩重建费用；

SRC——上部结构重建费用；

MIC——车辆行驶延迟导致的损失；

PIC ——是港口业务的损失。

对于可能的人员伤亡损失 *LF* 可结合我国各个地区的 ICAF 值进行计算，有：

$$LF=N\times ICAF \tag{3.2.3-14}$$

式中：*N* ——为事故可能导致的人员伤亡数目，需根据具体工程情况以及交通情况分析确定；

ICAF——可按表 3.2.3-4 进行取值。

通过利用上述方法反复计算，我们就可以得到 *Loss-Cost* 曲线，如图 3.2.3-4 所示，进而得到优化的投资费用。

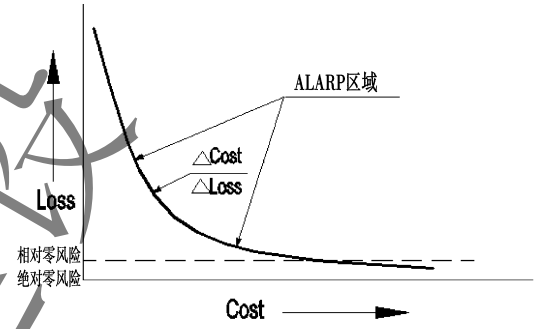

图 3.2.3-4　Loss－Cost **分析曲线**

3.3　船舶撞击荷载组合

3.3.1　按《公路桥涵设计通用规范》JTG D60－2004 第 4.1.6 条偶然组合采用永久作用标准值效应与可变作用某种代表值效应、一种偶然作用标准值效应相组合。此可变作用取汽车荷载效应，偶然作用取船舶撞击效应。

3.3.2　应根据桥梁所处的位置、通行的交通量和车辆的特点，在调研、分析、预测的基础上，提出合适的汽车荷载效应组合系数 LV 值。美国 AASHTO 的《公路桥梁船撞设计指南》在涉及船撞的极端事件极限状态 II 中，汽车荷载效应组合系数 LV 值取为 0.5，可供参考。

3.3.3　参与计算的洪水频率可不超过最高通航水位时的频率，流水压力的计算可参照其它水工、港工规范。

重庆工程建设

4　一般规定

4.1　基础资料收集

4.1.1　由于三峡大坝的建成，库区通航水位明显提高，航运条件明显改善，同时桥区的自然环境，如水流流向、流速、水流与桥梁轴线夹角等，也会随着蓄水位的改变而发生变化，这些变化都会对船舶的习惯航迹线产生影响。同时，由于水位的升高，库区水面变宽，水深增大，航道条件的改善使通航船舶的吨位不断增大，从而对跨江大桥的桥墩造成威胁。由于涉及面广、内容多，难度大，无类似资料可以借鉴，因此必须收集相关桥区水域的各类数据（桥梁数据、水流数据、船舶数据、航道数据、气象条件等）后，方可进行桥区水域船桥碰撞规律、船舶在桥区水域受风、流影响的运动模型研究等，进而确定桥梁的船撞发生概率。通过对相关资料的整理和分析，筛选出建立通航桥孔船舶航路、航向、船位及船舶过桥运动规律的基础数据。

4.2　通航条件

4.2.1　三峡库区形成后，库区航道尺度显著增大，使库区船舶逐步向大型化和标准化发展。而解决库区水位大幅度落差引起的船-桥碰撞和船舶航运问题，首先明确桥梁通航净空尺度，上、下行船舶通过桥区水域的航路、航向、船位及船舶过桥运动规律，以便将桥墩设置在最佳位置。

4.2.2　三峡库区一年四季水位都会发生巨大的变化，因此分析水位变化情况下的船桥碰撞概率对于库区船舶的航行有重要意义。从理论上说，当水位达到一定高度（距桥梁上部结构很近，致使船舶

撞到上部结构）时，无论船舶在航道中的什么位置航行，都会撞到桥，这是最高通航水位。而水位很低时（水面距河床底面很近），船舶无法在河道中航行，不会发生船桥碰撞事件。因此，船撞桥概率就在这两个临界点之间变化，即最高通航水位与最低通航水位之间是船舶经常航行时的水位，随着时间的变化航道水深发生周期性变化，作为计算防撞设计水位就从最低通航水位考虑。

4.2.3　桥位处的水流应按与船舶航行方向一致的水流和与船舶航行方向垂直的横向水流进行计算。

4.3　桥位与桥跨

4.3.1～4.3.3　在当今航运事业高速发展的时期，船与桥的矛盾也愈加突出。“一跨过江，江中无墩”无疑是防止船撞桥的上乘之法，最彻底但不经济，特别是在今天跨海大桥的修建中，这也是不现实的。船撞桥的发生犹如地震的发生一样，是一个概率问题，仅从桥梁强度上来考虑，想完全杜绝船舶撞塌桥梁事故的发生是不可能的。大多数情况下，船舶在航行中一旦驶入危险区域，会采取一些措施如减速、调整航向等来避免碰撞，而在实际中，船舶在横向上存在一定的航迹分布，当船舶行驶在不同位置时，其偏航角的分布和停船距离的分布也是随之变化的，这就要求桥梁在航道中的布置应符合一定的规律和要求。以保证桥墩位置、桥墩保护装置、航道有效宽度及其变化、船舶航迹、船舶操纵等处于受控范围。

4.3.4　当一跨过江时不存在撞击问题；但是不得不布置桥墩时，布置在浅水区域的桥墩，其所处的水深就有可能不满足吃水深的大型船舶的需求，因此该类船舶这时就有可能撞不到桥墩。船撞桥是在一个短时间内（通常只有几秒）发生的动力过程。在这过程中，船舶对桥梁的作用力是随时间而变化的力。

对于桩基础，由于其位于水下，一旦发生破坏，其修复难度较

重庆工程建设

大，而且修复费用高昂，因此，一般情况下我们并不允许桩发生破坏，设计单位在设计桩基础时其安全系数也普遍取得较高，安全系数通常情况下能达到 2.5～3。我国地基与基础设计规范中对承台底面的高程也做了相应的规定，以保证桩基不受漂浮物的直接撞击。

4.3.5～4.3.6 建于航道上的桥梁的墩台基础易受到船舶的撞击。在承受船舶撞击作用的过程中，桥梁结构会产生较大的内力和位移反应。若结构物的响应超过结构本身所能承受的范围，结构中的某些部位就会因位移过大或承载能力不足而发生破坏。然而，不同的基础形式在船撞作用下结构关键部位的响应是不同的。对于高桩承台的桥梁，船撞作用下结构的响应控制部位应是桩基础和桥墩。同样是桩基础的桥梁，下部结构受上部结构的约束程度的不同，结构的的反应也会有所差异。例如将最大船撞力作为设计船撞力进行桩基础的分析，对于动力效应较为敏感的斜拉桥，其等效静力分析结果通常小于动力分析结果；对于动力效应不太敏感的连续梁桥，其等效静力分析结果通常又大于动力分析结果；而对于连续刚构桥来说，等效静力分析结果与动力分析结果相差不大。因此，设计船撞力的取用应针对不同的桥梁形式予以区分。

4.3.7 设置桥梁通航孔时要考虑后期航道的变迁对桥梁布跨的影响，比如根据现有航道情况布置的通航位置由于航道的变迁，在远期将成为非通航位置，现在非通航的位置在远期将变为通航位置。因此，在桥型选择和通航孔布置时要充分考虑这些因素的影响。

4.3.8 防撞设施的设计需要根据桥位处的水文资料，结合桥墩位置、桥墩外形、水流速度、水位变化情况、通航船舶类型、碰撞速度等因素进行综合考虑，根据跨径大小选择合理的桥型结构。由于拱桥拱圈抗撞击力较弱，而中承式和上承式拱桥的拱圈常常处于被撞击区域内，因而设计时应非常注意。

4.4 通航孔与非通航孔

4.4.1 船舶撞击角度分布一直是船撞研究中的一个难点，因为船舶的撞击角度不仅与船舶的偏航角度有关，还与桥梁下部结构几何形状和相对航道位置有关，不同的桥梁下部结构几何形状将会导致不同的撞击角度。确定撞击角度分布最合理的方法是对桥位处船撞桥事故资料进行统计得到。我国学者林铁良利用数学模型从船舶的偏航角度入手，得到了直航路上船舶撞击矩形桥墩的撞击角度分布，范围大都集中在 6.3°～30°之间，占 90％以上，其中 10°～20°占 61％。我国学者曹映泓在对湛江海湾大桥船舶撞击力的概率研究中，撞击角度分布取为 0°～10°占 60％，10°～20°占 30％，20°～30°占 10％。

从三峡库区三座跨江大桥的船舶偏航角的观测结果来看，船舶的偏航角大都集中在 2°～14°之间。根据实际的工程情况，直航路上的桥梁其撞击角度均值可取为 10～15°，标准差可取为 4～6°，然后转化为极值Ⅰ型的参数。若非直航路，则其均值还需加上桥轴法向与航道的夹角。因此提出了本条文的要求。

4.4.2 根据交通部《三峡工程通航标准》拟定的代表船队有两类：一类是 1942KW 推轮配合 1000-3000T 驳船组成的 5 种万吨级船队，二类是 600KW 推轮配合 500T 驳船组成的干支直达的 3000T 级船队。

表 4.4.2 三峡库区 175 米蓄水后船队代表船型主要尺度一览表

通航船队	总长(m)	型宽(m)	吃水(m)
1+6×500T 驳船	126	32.4	2.2
1+9×1000T 驳船	264	32.4	2.8
1+9×1500T 驳船	249	32.4	3
1+6×2000T 驳船	196	32.4	3.1
1+4×3000T 驳船	196	32.4	3.3
1+4×3000T 驳船	219	32.4	3.3

针对上述船队，桥跨跨径设计横向通航宽度一般通过通航净空论证确定是能绝对保证，但通航竖向净空在主航线上能满足，偏离航线后驾驶舱和桅杆就有可能撞击桥梁上部结构，因此本条文还要求桥梁竖向净空应满足该航道上的船舶在空载压舱条件下通行时的最大船高的要求，以避免驾驶舱和桅杆撞击桥梁上部结构。

4.4.3 三峡水库成库后，其水位变幅达30多米，库区航道的通航条件得到了很大的改变，成库后与成库前在桥区河段，主要有以下几个方面存在明显的改变：

1 库区航道水面宽度较成库前增加数倍；

2 流速、比降重新调整；

3 风浪强度增加；

4 雾天增多，浓度加大，船舶驾驶可视度降低；

5 船舶上下水航线从原来上走弯、下走直，变为上下都走直线；

6 桥墩受淹没部位上移。

所有这些因素都将使非通航孔船桥碰撞的概率上升，为了克服这一不利因素，对于库区内的桥梁要求非通航孔的跨度比一般地区的跨径大以减少非通航孔水中桥墩的数目，同时通过风险概率分析对非通航孔桥墩应要求具备基本的抗撞击能力。

4.5 船 舶

4.5.1～4.5.5 三峡库区成库前受航道条件制约，最大代表船型（船队）为1＋3×1000T驳船的船队。三峡库区形成后，库区航道尺度显著增大，使库区船舶逐步向大型化和标准化发展。根据交通部《川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列》的规定，8种标准型驳船按要求与对应配套推船可组合成不同队形，所组成的最大船队分别为：(1)1＋15×500T驳船；(2)1＋12×800T驳船；(3)1＋9×1000T驳船；(4)1＋4×2000T驳船；(5)1＋4×2500T驳船；(6)1＋4×3000T；驳船；(7)1＋4×3500T驳船；(8)1＋4×4000T驳船。库区代表性船队的长度不超过266 m，最大宽度不超过32.4 m，最大吃水不超过4.0m。

表4.5.1 三峡库区典型顶推船队主要参数

驳船型号 吨级	驳船平面尺度 LOA×BOA m×m	船队行数	船队列数	配套推船总功率 kW	船队总长 m
500	45～47×10.8	2	1	272	≤266
		3	1	400	
		4	1	441	
		5	1	588	
		2	2	441	
		4	2	882	
		2	3	882	
		3	3	1103	
		4	3	1500	
		5	3	1942	
800	52～55×10.8	2	1	272	
		3	1	441	
		4	1	588	
		2	2	588	
		4	2	1500	
		2	3	882	
1000	65～68×10.8	3	3	1500	
		4	3	1942	
		2	1	400	
		3	1	441～588	
		2	2	736～882	
2000	70～75×13.3	2	3	882～1103	
		3	3	1500	
		2	1	441	
2500	70～75×16.2	3	1	736～882	
		2	2	882	
		2	1	588	
3000	75～78×16.2	3	1	882	
		2	2	1103	
		2	1	736	
3500	85～90×16.2	3	1	882	
		2	2	1500	
		2	1	736	
4000	85～90×16.2	2	2	1500	
		2	1	882	
		2	2	1500	

注：1. 表中所列之配套推船总功率为普通驳船队推荐值；

2. 推船尺度的选择应使船队总长控制在要求的范围内。

重庆工程建设

表 4.5.2　三峡库区驳船标准船型主尺度系列

船型（载货吨级）	LOA m	BOA m	设计吃水 m	设计载货量 t	备注
500	45～47	10.8	2.0～2.2	600～700	涵盖 GB/T18181－2000，JT/T447.1－2001，部尺度要求
800	52～55	10.8	2.2～2.4	700～950	涵盖 JT/T447.1－2001
1000	65～68	10.8	2.4～2.6	1000～1250	涵盖 GB/T18181－2000，JT/T447.1－2001，部尺度要求
2000	70～75	13.3	2.6～3.2	1500～2200	现有优秀船型，有 700 多艘。
2500	70～75	16.2	3.0～3.2	2300～2800	涵盖 GB/T18181－2000，JT/T447.1－2001，部尺度要求
3000	75～78	16.2	3.3～3.5	2800～3200	涵盖 GB/T18181－2000，JT/T447.1－2001，部尺度要求
3500	85～90	16.2	3.5～3.8	3300～3800	涵盖 GB/T18181－2000，JT/T447.1－2001，部尺度要求
4000	85～90	16.2	3.8～4.0	3800～4200	涵盖 GB/T18181－2000，JT/T447.1－2001，部尺度要求

4.6　防撞设施

4.6.1～4.6.3　采用桥梁防撞设施的目的是，防止桥梁因船舶撞击力超过桥墩的设计承受能力，保护桥梁结构安全。工程上通过采用不同型式的防撞设施，可以阻止船舶撞击力传到桥墩（或桥梁），或者通过缓冲消能防撞设施，延长船舶的撞击时间，减小船舶撞击力，从而最终保护桥梁安全。可分为主动抗撞和被动防撞两类。主动抗撞是指结构性防撞，目前众多桥梁结构规模大且重要性高，因而防撞设计均应与桥梁结构设计时一并考虑，即需要根据桥墩的自身抗撞能力、桥墩位置、桥墩外形、水流速度、水位变化情况、通航船舶类型、碰撞速度等因素一并考虑。防撞设施比选时一般要求满足如下条件：

1　对碰撞的船舶能量进行消能缓冲，使船舶不能直接撞击桥墩，或使船舶撞击力控制在安全范围内；

2　在各种水位条件下，对各种船舶的装载状态，撞击船舶不能直接触及墩壁，水下球艏不能直接撞击承台和桩基；

3　防撞设施不能影响航道的通航，占用航道范围尽量少；

4　通过合理的结构形式、各种缓冲材料的布置，尽量减小通航船舶的损伤；

5　防撞设施制造、安装、维护和修理的经济性较好；

6　防撞设施具有很好的可靠性和安全性。

4.7　航行监测与预警

4.7.1～4.7.3　三峡工程蓄水后，由于三峡库区航道等级的提高，必将有更多的大型船舶参与黄金水道的运营，使长江上游水道变得非常繁忙，通航船舶呈现大型化、专业化发展趋势，同时桥区环境的改变，如流速、风速、弯道、冲刷、淤积等，它不但涉及到船舶通行的安全，也严重影响着桥梁的安全运营，为保障三峡库区航运健康、持续发展，确保安全运输及科学化管理形势稳定，利用现代信息技术、无线通信技术、卫星定位技术、地理信息等技术，将船桥碰撞预警报警、航行船舶状态、航道状况、天气气象、船闸状况等数据与调度、海事、航道等交通业务管理有机地结合起来，搭建一个集数据采集、安全管理、预警报警、查询、控制、管理、决策、服务于一体的智能交通平台，实现对三峡库区船桥碰撞预警及在线监控，确保库区通航和桥梁结构安全。

重庆工程建设

5 船舶撞击力估算方法

5.1 一般规定

5.1.1～5.1.3 船桥碰撞的力学问题涉及多个学科，如船舶结构力学，碰撞力学、水动力学、桥梁工程、岩土力学等。随着船桥碰撞理论的发展和试验研究的逐步深入，各国学者依据各自的研究成果提出了很多船撞力的简化计算公式。一些国家在制定桥梁设计规范时，参考了有关的研究成果或进行了专题研究，对船撞力的计算也采用了一些简化公式，用于桥梁的静力设计。随着近年来计算机技术的迅速发展，有限元数值模拟技术已经广泛应用于航天、机械、汽车、船舶等领域。大量实例已经证明，在建立正确的模型和计算控制的基础上，有限元数值模拟技术是一种有效且可靠的分析方法。近几年来，国内外的学者和科研机构在这方面做了大量的研究工作。在船舶碰撞桥梁的研究中，数值模拟技术日益被研究者们所采用。在船桥碰撞的数值模拟分析中，可以考虑相撞结构材料的非线性本构关系，定义构件之间的碰撞接触面，在时域中计算每一步相撞结构的内力和变形，直至碰撞能量耗散，从而可以详细描述整个碰撞过程中的各种力学现象。

船撞桥是在一个短时间内（通常只有几秒）发生的动力过程。在这过程中，船舶对桥梁的作用力是随时间而变化的力。目前，各国规范和各种计算理论包括本指南上述提出的船撞力计算方法，船撞力均是以静力荷载的形式给出的。AASHTO 规范采用的设计船撞力是一个长时平均撞击力。Pedersen 等根据丹麦大带桥的研究，认为在船舶碰撞分析和防护系统设计中，采用长时的最大撞击力要比平均撞击力更为合理。实际上，对设计船撞力取值的争论包含了两个方面的问题。一是如何获取船舶撞击力

的精确时程，另外一个问题是将船撞力这样一个动力荷载简化成静力荷载是否具有合理性。在目前的研究中，船撞力时程可以通过船撞桥仿真计算获得，而将动力时程简化为一个静荷载则需要对结构物的动力响应进行研究。

众所周知，将船撞力作为一个静荷载加到桥梁结构上得到的结果是结构的静内力和静位移，而将船撞力时程加到结构物上求出的是结构的动内力和动位移，因此这两者之间有着本质的差别。从不同的角度来看待这个问题，得出的结论和处理方法是不同的。从工程设计角度来看，得到一个用于工程设计的船撞力时间过程并非易事，若将船撞力考虑成一种静荷载，能够很大程度上简化计算，提高桥梁设计的效率。但这样的作法有一个前提，就是这种静荷载形式的船撞力计算出的结构物内力和位移应与船撞力时程计算出的结构内力和位移反应的幅值基本相当。

5.2 船舶撞击的范围

5.2.1～5.2.2 基于历史事故资料船舶与桥梁结构撞击所关心的基本区域是在可通行航道的中心区域。中心区域定义为 4.4.1 节讨论过的在每侧上水和下水通行水域 3LOA 距离之内。在中心区域以外，桥梁构件应该满足 5.3 节中的最小撞击要求。在此中心区域内，必须依照 5.4 节定出撞击速度，依照方法 I、II 或 III 定出设计船舶，以便确定桥梁的设计船撞力。

5.3 最小撞击力要求

5.3.1～5.3.2 设计者必须确定航道中典型船舶的通航路线。船舶的近似航迹可根据对使用该航道船舶的实际观察，与使用航道的领航员和船舶操作者讨论来得到，或根据经验来估计。船舶通过航道中心线位置是非常重要，因为它是船舶撞击速度分布、

重庆工程设计

撞击力分布和几何概率的原点。

水深的测量应从泥水分界线开始到平均高水位。一般认为它表征了桥墩处实际最大水深的近似值。河水泛滥和热带、温带风暴引起的极度高水位时期可以导致水深显著地超过计算所用的平均水位线。推荐使用平均水位高度而不是极度高水位，这是因为在形成本指南的基本框架时关于船舶频率和事故资料统计用的是年平均值。在那些季节性的泛滥或暴风雨代表了年高水位行为显著的部分情况，对设计水位的选择必须进行判断。

5.4 船舶撞击速度

5.4.1～5.4.2 应根据与上述确定设计水位相同的方法来选择桥位处水流速度设计值，设计水流速度应代表年平均值而不是在某些特定情况的偶然的极大值。对那些季节性的泛滥或暴风雨占年水流活动的显著的部分的情况，必须对设计水流值进行判断。对于大多数的水道，2%水位线高度经常是由统计资料可以得到的，它代表了水位高度等于或大于其所占总时间的2%。

5.4.3 设计撞击速度的选择是船撞设计指南中一个重要的设计参数。设计者在确定航道上航行的船舶速度时需采用判断法。选择的速度要反映典型风、水流、可见度、逆流交通量、航道尺寸等条件下设计船舶的典型航行速度。考虑到航道中可能存在的水流速度，下水船舶要比上水船舶更需要不同的航行速度。

总的说来，设计速度不能取代表极端情况如大浪，大风和其它极端气候条件下的极端值。在这种条件下航行的船舶不能代表年平均情况，不能反映典型航行情况。

指南编制过程中建议撞击速度采用三角分布模型，是基于国际上咨询公司对历史撞击事件回顾的结果。数据当然稀少，偏航的轮船和驳船与离航道较远的桥墩相撞时的速度较与靠航道较近的桥墩相撞的速度小。离航道很远的偏航船舶以水流速度移动，离

航道很近的偏航船舶移动速度接近主航线上的轮船和驳船速度。精确的速度递减分布是难以确定的，指南里采用三角分布是因为简单和能合理地模拟偏航船舶的速度情况。从船舶航行中心到航道边缘处典型船舶的穿越速度是常数，该速度到距离船舶航行中心线3LOA处降到最低设计速度。船舶速度等于水流速度的界限距离定为3LOA是基于历史上很少在超过这个距离处发生事故(漂浮船舶除外)。

5.5 船舶撞击能量

5.5.1 指南里船舶撞击能量的得来是采用标准关系计算移动物体的动能 KE：

$$KE=\frac{M(V)^2}{2}=\frac{W(V)^2}{2g} \qquad (5.5-1)$$

式中：M ——船舶的质量；

g ——重力加速度；

W ——船舶的排水吨位；

V ——船舶撞击速度。

KE 采用 J 表示，M 用吨表示，V 用 m/s，g＝9.8m/s^2，包含水动力质量系数 C_H，等式C5.5-1导出下面的式子：

$$KE=500C_HMV^2 \qquad (5.5\text{-}2)$$

这个等式里包含了水动力质量系数 C_H，考虑了周围水对移动船舶的影响。

由于很多因素影响它的幅值，很难找到 C_H 的一个单一值。对船舶停泊和护舷物设计中的测量和计算做了各种各样的广泛讨论。以调查为基础，规定在计算船舶停泊时的动能时，除非设计者有很好的理由采取其它值，假定 C_H 的值在1.5(对于龙骨下大间距)到1.8(对于龙骨下小间距)。这些值使用于船舶横向停靠码头，在横向运动中相对较多的水质量一起和船舶移动。对于直行的船舶和船舶一起移动的水质量就小，因此 C_H 的值要比船

重庆工程建设

舶停泊操作时要小。

指南的一个基本理念是撞击荷载能代表最不利情况，船舶以较高的速度向正前方前进后发生的正面碰撞。对于加速度沿船舶长度方向，龙骨下距离较大的航道，根据 Saul 和 Svensson，水动力质量系数为 $C_H=1.05$。对于龙骨下距离较小的航道，水动力质量系数增加 1.8/1.5 的比例接近 1.25，它和前面章节中讨论的船舶停泊时增加的水动力质量相似。

指南里不做要求，对斜撞引起的动能计算是有数倍意义的。在碰撞事件中碰撞能量由船舶或桥墩来吸收，E 是撞击角度 α、碰撞船舶和桥梁结构间的摩擦系数 μ 的函数。Saul 和 Svensson 的研究给了如下关系：

$$E=\eta(KE) \tag{5.5-3}$$

根据 Saul 和 Svensson 的研究，η 的值如图 5.5-1 所示为撞击角度和摩擦系数的函数。

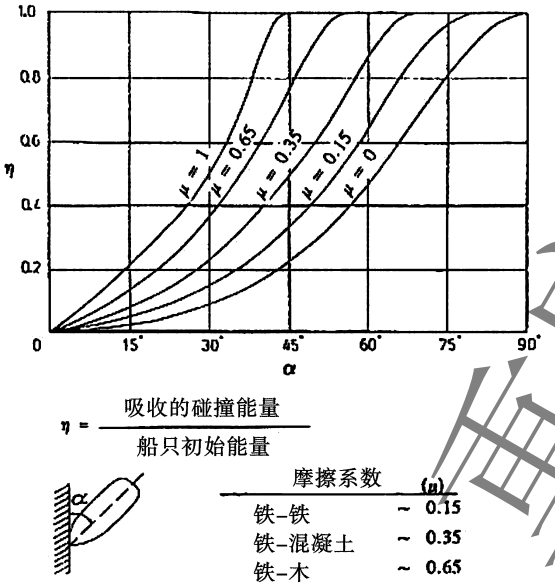

图 5.5-1　船舶或桥梁结构吸收的撞击能与撞击角度和摩擦系数关系图式

5.6　轮船对桥墩的撞击力

5.6.1　DWT 为船舶恒重吨位(Dead Weight Tonnage)的缩写，表示船舶在营运中能够使用的载重能力。本指南着眼于桥梁设计船撞力的简化公式，首先采用数值模拟的方式来获取船艏正撞刚性墙的简化计算公式，然后通过考虑承台形状、尺度以及碰撞角度等因素对撞击力的修正，来获得船撞力简化公式的实用计算方法。具体获取步骤有以下两步：

1　通过对 3000DWT～50000DWT 的五艘船撞击刚性墙的一系列仿真计算，深入分析和研究船舶质量、吨位、撞击速度等因素对于船撞力的影响，提出船艏正撞刚性墙的等效船撞力计算公式。

2　针对桩基础形式的桥梁，讨论了承台形状、尺度以及碰撞角度对撞击力的影响，并采用几种修正系数对船艏正撞刚性墙的等效船撞力进行修正，从而得到船撞承台的等效船撞力计算公式。

通过碰撞仿真计算，分析了船舶质量或吨位、撞击速度、撞击角度和承台形式等因素对于船撞力的影响，得出了基于仿真分析的船撞承台的撞击力简化计算公式。

1)最大船撞力的计算公式

$$P_m=0.017\eta_1\gamma_1\xi_1 \mathrm{M}^{0.7}\mathrm{V} \tag{5.6.1-1}$$

$$P_m=0.031\eta_1\gamma_1\xi_1(DWT)^{0.66}V \tag{5.6.1-2}$$

式中：P_m ——最大船撞力(MN)；

M ——船舶的总质量(t)；

DWT ——船舶的恒吨位(t)；

V ——船舶撞击速度(m/s)；

η_1 ——最大船撞力的承台厚度修正系数；

γ_1 ——最大船撞力的碰撞角度修正系数；

重庆工程学院

ξ_1 ——最大船撞力的承台圆弧半径修正系数。

各系数分别见下：

$$\eta_1=1-exp\left(-\frac{6t}{H_s}\right)$$

$$\gamma_1=k\cos\theta+\gamma_0$$

$$\xi_1=0.8R^{0.068}$$

2)局部平均船撞力的计算公式

$$P_1=\eta_2\gamma_2\xi_2(0.018V+0.0025)M^{0.66} \quad (5.6.1\text{-}3)$$

$$P_1=\eta_2\gamma_2\xi_2(0.028V+0.0106)(DWT)^{0.64} \quad (5.6.1\text{-}4)$$

式中：P_1 ——局部平均船撞力(MN)；

M——船舶的总质量(t)；

DWT ——船舶的恒重吨位(t)；

V——船舶撞击速度(m/s)；

η_2——局部平均船撞力的承台厚度修正系数；

γ_2——局部平均船撞力的碰撞角度修正系数；

ξ_2——局部平均船撞力的承台圆弧半径修正系数。

各系数分别见下：

$$\eta_2=1-exp\left(-\frac{5.2t}{H_s}\right)$$

$$\gamma_2=c_1\gamma_1$$

$$\xi_2=0.766R^{0.082}$$

3)总体平均船撞力的计算公式

$$P_g=\eta_3\gamma_3\xi_3(0.010V+0.0062)M^{0.66} \quad (5.6\text{-}5)$$

$$P_g=\eta_3\gamma_3\xi_3(0.016V+0.0117)(DWT)^{0.64} \quad (5.6\text{-}6)$$

式中：P_g ——总体平均船撞力(MN)；

M ——船舶的总质量(t)；

DWT ——船舶的恒重吨位(t)；

V——船舶撞击速度(m/s)。

η_3——总体平均船撞力的承台厚度修正系数；

γ_3——总体平均船撞力的碰撞角度修正系数；

ξ_3——总体平均船撞力的承台圆弧半径修正系数。

各系数分别见下：

$$\eta_3=1-exp\left(-\frac{4.7t}{H_s}\right)$$

$$\gamma_3=c_2\gamma_1$$

$$\xi_3=0.596R^{0.08}$$

通过以上对各简化公式计算结果的比较可以发现，本指南公式 P_m 的船撞力计算结果对小吨位船（如 3000DWT、5000DWT）介于 AASHTO 规范公式和欧洲规范公式的计算结果之间，而对大吨位船（如 12000DWT、50000DWT）的船撞力计算结果较 AASHTO 规范公式的大。P_l 的计算结果对小吨位船与欧洲规范公式的比较接近，而对于大吨位船舶则介于 AASHTO 规范公式和铁路规范公式之间。P_g 的船撞力计算结果对小吨位船与铁路规范公式的比较接近，对大吨位船则要大于铁路规范公式的结果。

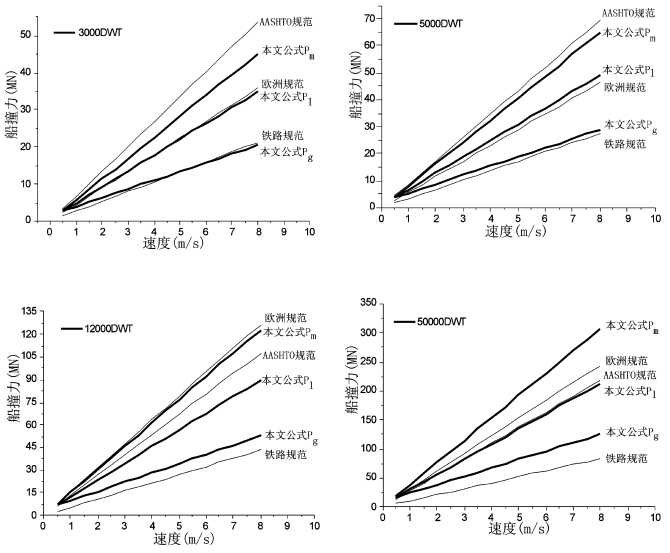

图 5.6.1-1　各船撞力公式正撞刚性墙计算结果比较

重庆工程建设

5.7 轮船对桥梁上部结构的撞击力

5.7.1 现有研究表明，在质量和速度一定的条件下，最大撞击力随着碰撞物体之间的接触面积增大而增大。

1 承台厚度与最大撞击力的关系应符合下列规定：

图 5.7.1-1 和图 5.7.1-2 是 50000DWT 和 12000DWT 船舶分别撞击 6m、8m、10m 和 12m 承台的计算结果。图 5.7.1-3～图 5.7.1-4 是 5000DWT 和 3000DWT 船分别撞击 3m、5m 和 7m 承台的计算结果。从图中可以看出，当速度恒定时，随着承台厚度增加而增大；当速度从 2.0m/s 变化到 6.0m/s 时，的值有增有减，各种吨位船舶的值并未呈现一致的变化趋势。这就说明与船艏的结构型式和刚度有较大的关系。此外，从这几个吨位船的计算结果来看，的变化范围处于 0.48～1.0 之间，不同速度下的变化幅度比较大，尤其是对大吨位的船舶（如 50000DWT 和 12000DWT）。

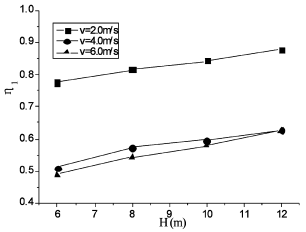

图 5.7.1-1 50000DWT 关系

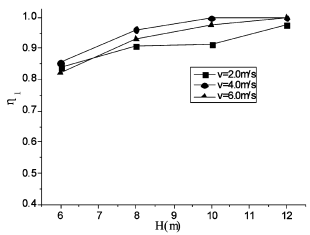

图 5.7.1-2 12000DWT 关系

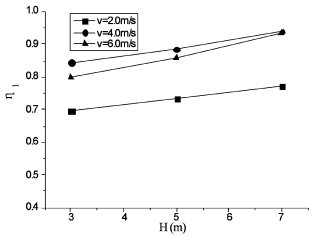

图 5.7.1-3 5000DWT 关系

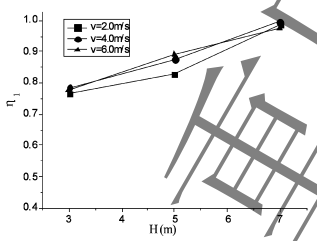

图 5.7.1-4 3000DWT 关系

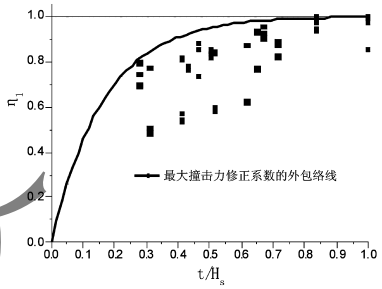

图 5.7.1-5 最大撞击力的承台厚度修正系数外包络线图

2 承台厚度与局部平均撞击力的关系应符合下列规定：

经分析比较，在速度恒定的情况下，η_2 随承台厚度增大呈上升趋势。由于 η_2 的变化规律基本与 η_1 相同，因此可采取与确定 η_1 相同的方法来确定 η_2 的计算公式。图 5.7.1-6 为局部平均撞击力修正系数的外包络线，其函数表达式为：

$$\eta_2 = 1 - exp\left(-\frac{5.2T}{H_S}\right) \qquad (5.7.1\text{-}1)$$

式中：η_2 ——局部平均撞击力的承台厚度修正系数；

t ——承台厚度（m）；

H_s ——船艏高度（m）。

当 $t/H_s \geq 1.0$ 时，$\eta_2 = 1.0$。

3 承台厚度与总体平均撞击力的关系应符合下列规定：

经分析比较，在速度恒定的情况下，各种吨位船舶的 η_3 均随承台厚度增大呈上升趋势。η_3 的确定方法同 η_1 和 η_2。图 5.7.1-7 为总体平均撞击力修正系数的外包络线，其函数表达式为：

$$\eta_3 = 1 - exp\left(-\frac{4.7T}{H_S}\right) \qquad (5.7.1\text{-}2)$$

式中：η_3 ——总体平均撞击力的承台厚度修正系数；

t ——承台厚度（m）；

H_s ——船艏高度（m）。

当 $t/H_s \geq 1.0$ 时，$\eta_3 = 1.0$。

重庆工程建设

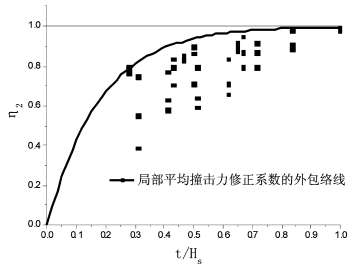

图 5.7.1-6　局部平均撞击力的承台厚度修正系数外包络线图

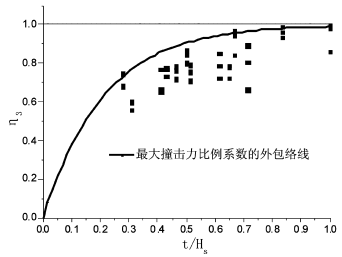

图 5.7.1-7　总体平均撞击力的承台厚度修正系数外包络线图

5.7.2～5.7.3　有关船舶上部结构(甲板室,桅杆)和桥梁上部结构构件之间撞击力的数据有限。Cowiconsul 在 70 年代对丹麦大海带桥其上部结构和甲板室的撞击调查得到的力如下:

对于与 1000DWT 货船甲板室撞击,$P_{DH}=5337866$N;

对于与 100000DWT 油船甲板室撞击,$P_{DH}=26689332$N。

以这些数据为基础,在选择桥梁上部结构与甲板室相撞的设计撞击力值时,提出了式(5.7.2-1)和式(5.7.2-2)。出版的文献里有关于桅杆的撞击力数据很少。以历史上的几次与桅杆相撞事故中桥梁梁体和上部结构的损伤为基础来估算撞击力,提出了式(5.7.3-1)。

5.8　驳船对桥梁下部结构的撞击力

5.8.1　驳船损坏长度同样来源于 Mei-Dornberg 所做的驳船撞击研究。从实验数据中,Mei-Dornberg 对于驳船的变形,撞击变形能提出了如下公式,单位为 m 和 J。

$$LB=3.1\times(\sqrt{1+1.3\times10^{-7}\mathrm{KE}}-1) \qquad (5.8.1)$$

5.8.2　与轮船撞击数据相比,很少有有关驳船撞击力的研究报道出现在发表的文献上。由式(5.8.2)确定的驳船撞击力来源于德国 Mei-Dornberg 在 1983 年以西南 saar 地区水运和船舶董事会的名义做的研究。Mei-Dornberg 进行的试验和理论研究是为了研究驳船与船闸出口结构和桥墩相撞时的力和变形程度。Mei-Dornberg 还研究了由于斜撞引起的驳船进入斜坡堤岸和墙之上的方向和高度以及沿航道两侧的陆地。

Mei-Dornberg 的研究包括在 3 个 1:4.5 的驳船底部放一摆锤作用动力荷载,在 1 个 1:6 的驳船底部作用一静荷载以及数值计算。在研究中发现测试得到动力和静力荷载之间没有显著的差别。

采用公制单位力以 MN 为单位,Mei-Dornberg 提出了如下的公式:

$$\mathrm{FB}=\begin{cases}60.0LB, & LB<0.1m\\ 6.0+1.6LB, & LB\geq0.1m\end{cases} \qquad (5.8.2)$$

上述公式主要来源于标准式底卸式驳船,其基本尺度为:船宽 10.7m、船长 60m、船高 3.7m、空载吃水 0.52m、满载吃水 2.7m、总质量 1540 吨。其他尺度的底卸式驳船,其撞击力应通过船宽来进行修正。

重庆工程设计

6　桥梁结构主动抗撞设计

6.1　一般规定

6.1.1　本章的规定适用于采用等效静力法对桥梁自身结构抗船舶撞击能力进行计算和按现行的公路、市政桥梁设计规范对桥梁上、下部构件进行验算。

6.2　撞击荷载位置与方式

6.2.1　三峡库区桥梁水文条件的最大特点是一年之中水位变幅大，最大可达 30 多米。按三峡大坝 175m-155m-145m(吴淞高程)的水位调度计划，常年回水区和变动回水区在 11 月至来年的 3 月枯水期受三峡大坝水位的控制，水位在 175m 附近变动；常年回水区水位在 4 月至 10 月的洪水期受三峡大坝水位和上游洪峰流量的共同影响，在 145m-155m 附近变动；而变动回水区在此期间主要表现为天然河道的特点，水位主要受上游洪峰流量的控制，各种频率流量下的水位应根据水文调查计算确定。这就造成三峡库区桥梁的一部分桥墩或上部结构一年中部分时间因高水位存在被船舶撞击的可能，而在低水位情况下因处于岸上或因为船舶吃水深度不够而没有船舶撞击的可能。另一方面，水流流速对船舶撞击能量、撞击力有很大的影响，一般而言，三峡库区处于枯水期，水位较高，但流速较小，在 0.5m/s 左右；而处于洪水期，水位较低，但流速较大，可达到 3.0m/s 以上，具体数值应根据调查资料确定。最后决定桥梁船舶撞击后果严重性的是桥梁自身的抗力大小，一般而言，水位高时，船舶撞击点高，桥梁结构抗力小；水位低时，船舶撞击点低，桥梁结构抗力大；特别是对刚度较小的桥墩而言，高水位时桥梁的抗力要比低水位时的抗力小很多。因此三峡库区桥梁船舶撞击位置应根据调查取用在最高通航水位和最低通航水位之间一年出现不同频率水位进行确定。

6.2.2　在用船舶撞击荷载设计桥梁下部结构时，应包括两种工况：

1　保证下部结构的总体稳定，假定船舶的撞击以一个集中力作用在吃水线；

2　保证下部结构的每个构件均能承受来自船舶碰撞的任一局部撞击力。

必须将局部撞击力施加在可能与轮船或驳船船头伸出部分相接触的下部结构上，这一点已被事故案件记载充分证明。轮船和驳船船头倾斜长度往往长到足以能够越过防护系统而接触到薄弱的桥梁的构件，如图 6.2.2-1 和图 6.2.2-2 所示。

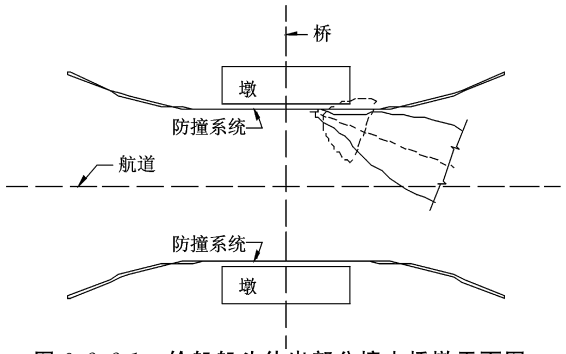

图 6.2.2-1　轮船船头伸出部分撞击桥墩平面图

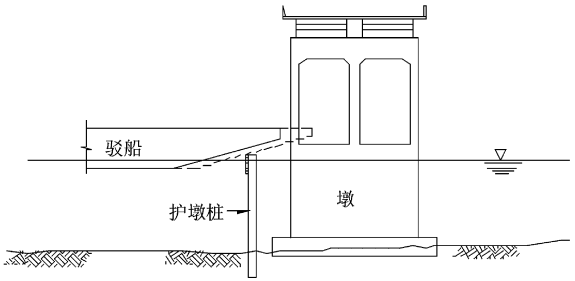

图 6.2.2-2　驳船船头撞击桥墩的立面图

重庆交工程设计院

6.2.3 一艘轮船或驳船的各部分能够撞击桥梁上部结构的构件，取决于桥下能够得到的竖直净高、水深、船型和特征以及船舶的装载状况。

6.3 结构抗力计算要求

6.3.1 三峡库区船撞桥梁主要是撞击桥墩，少数也有可能撞击到上部结构的主梁或拱圈。船舶撞击上部结构的主梁或拱圈以及斜拉桥的主墩或与上部结构刚性连接的连续刚构桥的主墩，自然应将上、下部共同建模，以便分别验算上部、下部和基础在船撞荷载作用下的强度、位移等；船撞击与上部结构采用支座连接的桥墩时，简化计算模型中可不考虑上部结构，但应考虑上部结构传给该桥墩的力及对该桥墩的约束。

采用精细化的桥梁船撞动力数值模拟分析时，计算模型考虑上、下部结构的整体关联性显得更为重要。通过建立精细化的桥梁三维实体有限元计算模型和船舶模型，进行船撞动力数值模拟分析，可以得到较为精确的桥梁设计船撞力，并了解桥梁结构关键部位的动力反应。

6.3.3 现行的《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025－86中规定公路工程钢结构按容许应力法进行设计。美国《公路桥梁船撞设计指南》规定容许应力允许提高50％。

现行的《钢结构设计规范》GB 50017－2003和即将颁布的《公路钢结构桥梁设计规范》JTG/ TD 64－2009均规定钢结构按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设防，《公路桥涵设计通用规范》JTGD 60－2004和《公路钢结构桥梁设计规范》JTG/TD 64－2009同时规定船撞桥梁做为偶然状况仅进行承载能力极限状态设计。

6.3.4 船舶撞击时应考虑到撞击荷载下结构的稳定性，且允许基础瞬间的提起或摇动包括和群桩持力底端或基础的接触区域

下层土的分离。在以往的工程应用中，基础在冲击荷载作用下的抗力通常可提高到1.2倍。

6.3.5 参照《公路桥梁抗震设计细则》JTG/TB 02-01-2008的第8.1节墩柱结构构造措施保证塑性铰性能。

6.3.6 桥墩基础总冲刷深度为自河床面算起的河床自然演变冲刷、一般冲刷与局部冲刷深度之和。三峡工程蓄水完成后，常年回水区和变动回水区在汛期和枯期的水位均有不同程度的提高，水深也有不同程度的增加，流速减缓，因此也不同程度丧失了天然情况下的冲刷条件，泥沙更易落淤。从总的趋势上说常年回水区和变动回水区在近期是属于淤积的，泥沙淤积的主要部位是河床较宽浅的边滩，弯道的凸岸和岸线参差不齐的凹岸缓流区。由于桥墩的阻水作用所导致的一般冲刷与局部冲刷，其冲刷深度是与过水的流速、流量直接相关的。大于一定的流速才会产生冲刷，流速越大，冲刷深度越深，而一般流速与流量是直接相关的，流量越大，流速也越大。一次大的洪峰过后，会在桥墩基础处留下较深的冲刷坑，但在过后，逐渐淤积的泥沙会将冲刷坑填平部分或全部填平。在三峡库区计算船桥碰撞倒塌概率时，要求按不同的水位分别计算，不同水位对应不同的流量、流速，因此也对应了不同的冲刷深度。对于常年回水区，较高的水位出现在枯水期，往往对应较小的流量和流速，因而冲刷深度往往较浅；较低的水位出现在汛期，往往对应较大的流量和流速，因而冲刷深度往往较深。对于变动回水区，较高的水位可能出现在枯期，也可能出现在汛期，因此较大的冲刷深度可能在较高水位时出现，也可能在较低水位时出现。因此应根据大桥所处的位置，按三峡工程常年回水区、变动回水区和天然河道分别按不同水位、流量和流速，结合库区近期总体的淤积趋势计算桥墩基础的冲刷深度。

6.5 下部构造要求

6.5.1～6.5.2 为了满足桥墩局部抗撞的要求，在桥墩可能遭受船舶撞击的范围内宜选用实心断面，以避免船舶撞击给桥墩造成局部损伤而影响大桥的整体结构安全。

6.5.4 分水尖的一个突出优点是当碰撞船舶的船体轴线与分水尖的轴线不共线时，在两者刚建立碰撞接触的瞬间，分水尖可以使撞击船舶的方向改变，从而减轻桥墩受到的威胁。

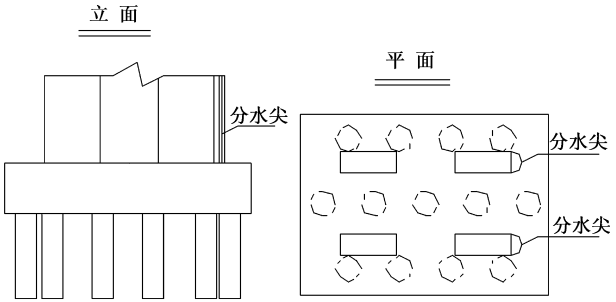

图 6.5.4 桥墩迎水面设置分水尖

6.5.5～6.5.6 桥墩顶部的横向挡块可参照抗震挡块设置，顺桥向盖梁的宽度可参照《公路桥梁抗震设计细则》JTG/TB 02-01-2008 进行验算。防止因船撞导致的纵、横向落梁措施可与桥梁抗震防止落梁措施一并考虑。

6.5.7 美国 AASHTO 规范为了给出桥梁结构被撞以后的安全状态，提出了以抗力与撞击力比值为基础的倒塌概率曲线，见图 3.2.3-1。从图中看出，如果桥墩或上部结构的抗冲击力大于设计船舶的碰撞冲击力，则桥梁的倒塌概率为零；如果桥墩或上部结构的抗冲击力处于设计船舶碰撞力的 10%～100%范围，则桥梁倒塌概率在 0.0～0.1 范围内呈线性变化；如果桥墩或上部结构的抗冲击力小于船舶碰撞力的 10%，则桥梁倒塌概率在 0.1～1.0 之间呈线性变化。要保证桥梁和船舶的安全最好的办法是避免撞击或桥梁结构抗撞能力安全富余较大。

7 桥梁被动防撞设施设计

7.1 一般规定

7.1.1 桥梁防撞设施的设计与防撞目标有关，但至少应保证桥梁受船舶撞击不致倒塌或发生严重的结构损伤，经临时加固后可维持应急交通使用。

7.1.2 桥梁结构自身抗撞能力的增强可通过增加墩身和基础的尺寸、桩基的直径和数量来达到，在增加费用不高的情况下，应优先考虑采用增强结构自身抗撞能力的方案。

7.1.4 防撞设施的几何外形应尽可能使船体轴线与防撞设施的轴线不共线，从而使两者在碰撞时刚建立接触的瞬间，就可以改变撞击船舶方向，从而减轻防撞设施和桥墩吸收的能量。

7.2 常用被动防撞设施原理与构成

7.2.1 前对桥墩防护系统的分类主要有三种，1991 年国际桥梁和结构工程协会(IABSE)将通常的桥梁保护结构分为防护板系统、支撑桩系统、系缆桩系统、人工岛或暗礁保护以及浮动保护系统五类；杨渡军教授在总结现有防护系统种类的基础上，将防护系统分为附着式防护系统、重力摆式防护系统、薄壳筑沙围堰防护系统等 10 类；在此采用的是按照船舶冲撞能量吸收方法和设置场所的不同的分类方法。

7.2.2 一体式防撞设施应符合下列规定：

1 一体式防撞钢套箱可考虑利用水下承台施工的钢套箱改建而成。

2 人工岛通常用沙或石作芯，并用厚的块石铺砌外层加以

重庆工程建设

保护，以防波浪、水流和冰的作用，其轮廓一般采用流线型，且顺水流方向较长，四周都有较平缓的斜坡。该系统具有能吸收很大的动能、限制船舶损坏等优点，但在三峡库区高水位落差的条件下，建造费用往往较高，且对景观有较大的影响，因而影响其在三峡库区的应用。

7.2.3 附着式防撞设施应符合下列规定：

2 附着式绳索方式防撞装置示意见图 7.2.3-1。

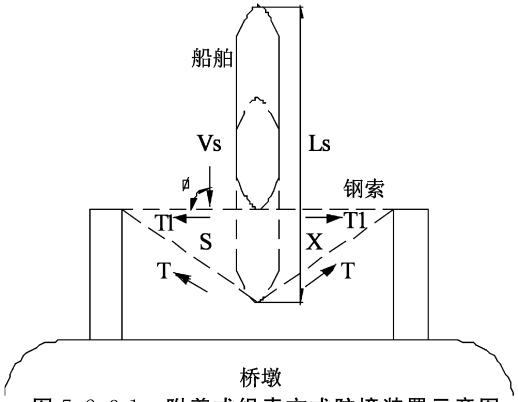

图 7.2.3-1 附着式绳索方式防撞装置示意图

4 重力摆式防护系统具有两种典型方式。

第一种典型方式的主要构件是一沉重的钢筋混凝土块，此钢筋混凝土块由固定在支承结构上的锚链或缆索悬挂起来，如图 7.2.3-2 所示。钢筋混凝土块作为重力摆，其迎船面装有充分柔韧的软木或橡胶作为摩擦面，以保证船舶与防护系统相撞时不擦伤船体。当船舶撞击时，摩擦面将来自船舶的撞击能量传递给钢筋混凝土重力摆，重力摆通过较长距离的位移耗散大量的撞击动能。此外，木材纤维之间的挤压和橡胶的变形也将提供一部分附加的能量吸收能力。

第二种典型形式是圆筒重力摆防护系统，重力摆悬挂在支承结构上，如图 7.2.3-3。不仅靠重力摆本身的重力作用原理来吸收撞击能量，同时还借助于流体效应，来提高这种结构的抗冲击

能力和吸收能量的能力。根据设计的船舶撞击力，设计者可以确定重力摆没入水中的深度。当其受到船舶撞击时，重力摆就在自身运动的同时推动其背面的流体同时运动，从而能够极大地提高这种结构抗衡撞击的能力，并能吸收更多的能量。

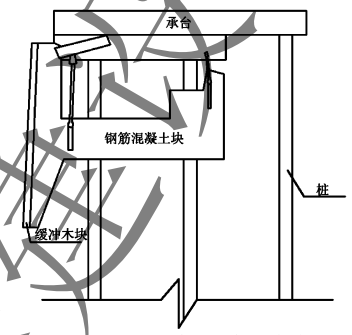

图 7.2.3-2 重力摆防撞设施方式一

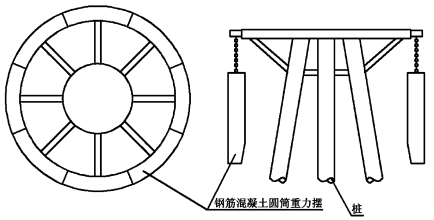

图 7.2.3-3 重力摆防撞设施方式二

7.2.4 独立式防撞设施应符合下列规定：

图 7.2.4-1 为集群式护墩桩的示意图。

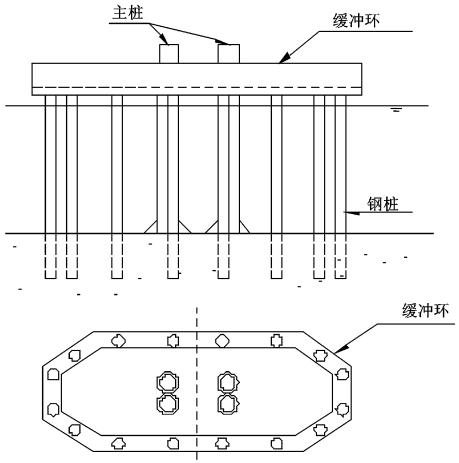

图 7.2.4-1 集群式护墩桩示意图

图 7.2.4-2 为青岛海湾大桥大沽桥 4 号墩独立护墩桩防护方案的示意图。

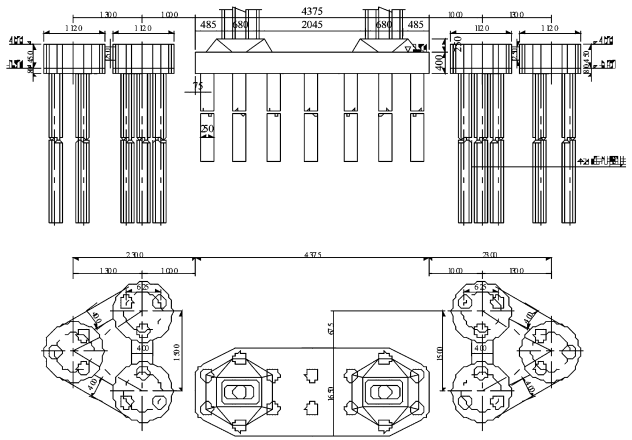

图 7.2.4-2　青岛海湾大桥大沽桥 4 号墩独立护墩桩防护方案示意图

7.3　三峡库区跨江桥梁被动防撞设施

7.3.1　三峡库区桥墩防撞有两个显著的特点，其一是水位的变幅大，一年内达 30m 之多，其二是通航的船舶的单船吨位在可预见的将来不超过一万吨，与桥墩相撞所产生的船撞力与长江下游或海港区域的大型海轮所产生的船撞力相比仍然较小。由此附着式浮式防撞钢套箱对三峡库区的桥墩有较好的适应性，其一是能适应水位的大幅变化，避免了其它形式的防撞装置对桥梁景观的不利影响，其二是对船舶撞击力有一定程度的折减，尤其是适应防撞能力相差不多的主桥边墩的防撞。

附着式浮式防撞钢套箱在实际运用中，桥墩在水位变动范位内的断面宜按等断面设计，以利于钢套箱随水位自由浮动。滑动摩擦式防撞钢套箱和滚动摩擦式防撞钢套箱均是可行的，分别见图 7.3.1-1 和图 7.3.1-2。滑动摩擦式防撞钢套箱构造上要比滚动摩擦式防撞钢套箱简单，造价上也略低，但滚动摩擦所产生的摩擦力要小于滑动摩擦所产生摩擦力，同时滚轮在撞击过程中也能消耗一定的能量，因此一般建议尽量采用滚动摩擦式防撞钢套箱。

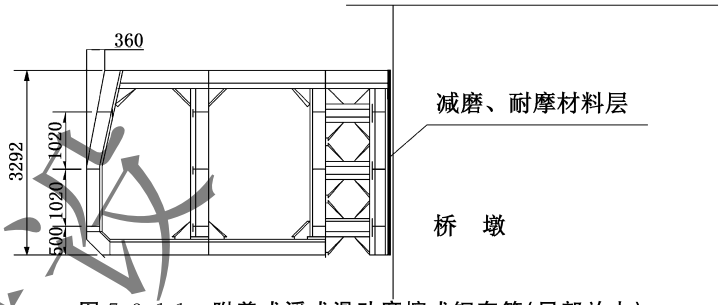

图 7.3.1-1　附着式浮式滑动摩擦式钢套箱(局部放大)

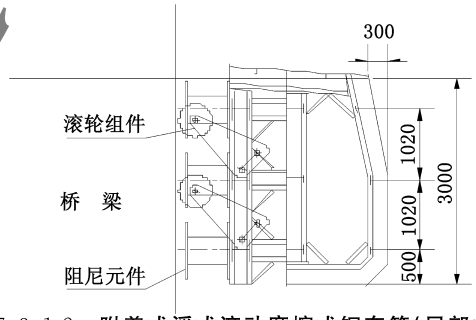

图 7.3.1-2　附着式浮式滚动摩擦式钢套箱(局部放大)

7.4　被动防撞设施的设计要求

7.4.1～7.4.5　桥梁在设计被动防撞设施时，应首先遵循的原则是使桥梁结构自身所受到的船撞力降低到由船撞风险分析方法确定的设计船撞力以下。即，防撞设施所承受或抵抗的力，应至少为设计船撞力减去桥梁结构自身抗力的差值，以保证桥梁结构的安全。被动防撞设施在设计时，应充分考虑到桥梁结构的形状、水流条件等因素，尽量使船舶的撞击动能保留在船上，以减少防撞设施或桥梁结构自身所受的力。由于吸能的需要，防撞设施内部构造通常较为复杂，采用传统的静力计算方法难以确定其防撞性能，因此建议采用目前国内外广泛采用的动力数值模拟方法进行计算，如有必要可对防撞设施的材料或重要构件进行试验，以保证数值模拟的正确性。

港口工程建设